

Trabajo Fin de Máster

## **Máster Universitario en Ingeniería Industrial**

# **Desarrollo de una herramienta de cálculo del rendimiento estacional de bombas de calor según la norma UNE-EN 14825**

## **MEMORIA**

**Autor:** Carmela Bao Ríos  
**Director:** Rafael Ruiz Mansilla  
**Convocatoria:** Enero 2017



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



## Resumen

La norma UNE-EN 14825 presenta una metodología de cálculo del SCOP de referencia (modo calefacción) y del SEER de referencia (modo refrigeración). Estos parámetros, que representan el rendimiento estacional de las bombas de calor, resultan de gran importancia a la hora de la determinación de la calidad de las mismas

Adicionalmente su determinación tiene un valor añadido, pues a partir de un cierto valor de SCOPnet permite su clasificación como energía renovable alternativa a instalaciones solares térmicas.

Dado que son múltiples la tipologías de equipos y sus formas de regulación para adaptarse a cargas parciales, diferentes climas, y temperaturas de trabajo, evaluar las prestaciones de acuerdo a esta norma no es tarea sencilla, y por ese motivo se ha pensado en abordar en este trabajo la creación de una herramienta de Excel capaz de calcular de forma automatizada el SCOP y el SEER para distintos equipos y fabricantes del sector.

De esta manera, en función de la tipología de bomba de calor objeto de estudio, el programa procederá al cálculo del rendimiento estacional, siguiendo la metodología expuesta en la UNE.

La programación del Excel se realizará tomando como base los ejemplos presentes en la norma, así como los datos proporcionados por distintos fabricantes de bombas de calor. El programa ha de realizar el cálculo para una gran amplitud de casos existentes en el mercado, utilizando procedimientos sencillos y de fácil comprensión para el usuario.

Finalmente se han podido validar algunos casos de equipos contrastados, para poder evaluar al menos de forma parcial, la fiabilidad de la herramienta.



## Tabla de contenidos

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>TABLA DE CONTENIDOS</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICAS</b>	<b>10</b>
<b>1. GLOSARIO</b>	<b>11</b>
<b>2. PREFACIO</b>	<b>13</b>
2.1. Origen del proyecto .....	13
2.2. Motivación .....	13
2.3. Requerimientos previos.....	13
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
3.1. Objetivos del proyecto .....	15
3.2. Alcance del proyecto .....	15
<b>4. BOMBA DE CALOR</b>	<b>17</b>
4.1. Definición y funcionamiento .....	17
4.2. Tipologías de bombas de calor .....	18
4.2.1. Según el medio que intercambia calor con el exterior y el medio que absorbe calor .....	18
4.2.2. Según el proceso llevado a cabo .....	19
4.2.3. Según su construcción.....	20
4.2.4. Según su funcionamiento.....	20
<b>5. CONCEPTOS BÁSICOS</b>	<b>22</b>
5.1. Valores puntuales.....	22
5.1.1. COP (Coefficient Of Performance).....	22
5.1.2. EER (Energy Efficiency Ratio) .....	22
5.2. Valores estacionales .....	23
5.2.1. SCOPnet según norma UNE 14825-2014 .....	23
5.2.2. SCOPon (Coeficiente de rendimiento estacional en modo activo).....	24
5.2.3. SCOP (Seasonal Coefficient Of Performance).....	24
5.2.4. SEERon (Factor de eficiencia energética estacional en modo activo de refrigeración).....	25

5.2.5. SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) .....	26
5.3. Bomba de calor como energía renovable .....	26
<b>6. CONTEXTO NORMATIVO .....</b>	<b>29</b>
6.1. Normas UNE.....	29
6.2. Legislación nacional.....	30
6.3. Legislación europea.....	32
<b>7. METODOLOGÍA DE CÁLCULO SEGÚN UNE 14825 .....</b>	<b>33</b>
7.1. Cálculo en modo calefacción .....	33
7.1.1. Cálculo del SCOPon de referencia .....	39
7.1.2. Cálculo del SCOPnet de referencia .....	41
7.2. Cálculo en modo refrigeración .....	42
7.2.1. Cálculo del SEERon de referencia.....	43
7.2.2. Cálculo del SEER de referencia.....	46
<b>8. HERRAMIENTA DE CÁLCULO .....</b>	<b>47</b>
8.1. Obtención del SCOPon, SCOPnet y SCOP de referencia .....	47
8.1.1. Datos declarados (Potencia y COP) .....	55
8.1.2. Procedimiento según tipología de equipo .....	59
8.1.3. Análisis de resultados .....	71
8.2. OBTENCIÓN DEL SEERon, SEER DE REFERENCIA .....	73
8.2.1. Procedimiento según tipología de equipo .....	75
8.3. Cálculo de la temperatura bivalente .....	77
<b>9. PRESUPUESTO DEL PROYECTO .....</b>	<b>82</b>
<b>10. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL .....</b>	<b>85</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>87</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>89</b>
Referencias bibliográficas .....	89
Bibliografía complementaria.....	90
<b>ANEXOS .....</b>	<b>1</b>
ANEXO A. Situación actual de la bomba de calor en España .....	1
ANEXO B. Etiqueta Energética. ....	3
ANEXO C. SPF (Seasonal Performance Factor) .....	4
ANEXO D. Código UserForm 1.....	6
ANEXO E. Código UserForm 2.....	8
ANEXO F. Código UserForm 3 .....	8

ANEXO G. Planificación temporal .....	9
---------------------------------------	---

## Índice de figuras

Figura 4.1. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor en modo calefacción (1).	17
Figura 8.1. Ecuación de Excel para el cálculo de la temperatura inferior. ....	53
Figura 8.2. Obtención de la temperatura superior. ....	53
Figura 8.3. Fórmula completa de cálculo de la temperatura superior. ....	54
Figura 8.4. Cálculo de Excel de la carga de calefacción cubierta por la bomba de calor. ....	54
Figura 8.5. Cálculo de Excel de la carga de calefacción cubierta por la bomba de calor considerando TOL y Tbiv. ....	55
Figura 8.6. Fórmula de elección de etapa. ....	65
Figura 8.7. User Form y extracto de código para programar ocultamiento de filas y columnas. ....	68
Figura 8.8. Captura de pantalla del Excel, apartado cálculo del SEER de referencia. ....	75
Figura 8.9. Fórmula de cálculo de la aproximación polinómica. ....	79
Figura 8.10. UserForm para la introducción o el cálculo de la temperatura bivalente. ....	80
Figura D.1. Userform para la generación de la tabla y mensaje de ayuda al usuario. ....	6
Figura D.2. Código ocultamiento de interpolaciones. ....	6
Figura D.3. Código ocultamiento filas y columnas tabla. ....	7

## Índice de tablas

Tabla 4.1. Unidad interior y exterior de una bomba de calor en función del modo de funcionamiento.....	18
Tabla 5.1. Factor de carga parcial según clima. Fuente: norma UNE EN 14825. ....	24
Tabla 5.2. COP mínimo necesario para la consideración de energía renovable en función la aplicación y de la zona climática. Fuente: IDAE (4).....	27
Tabla 5.3. Tabla coeficientes energéticos 2013. Fuente: Reglamento delegado UE (6). ....	28
Tabla 7.1. Tabla de temperaturas según la estación de referencia. Fuente: UNE EN 14825 (2).....	34
Tabla 7.2. Condiciones de carga parcial para el cálculo del SCOP de referencia, el SCOPon de referencia, el SCOPnet de referencia de unidades aire/agua para aplicaciones a temperatura media para la estación de calefacción de referencia W. Fuente: UNE EN 14825 (2).....	36
Tabla 7.3. Tabla C.1. Datos para el SCOP del ejemplo del Anexo C de la UNE-EN 14825 (2).....	37
Tabla 7.4. Extracto de la tabla C.2 Cálculo del PERIODO para el SCOPon del Anexo C de la norma UNE-EN 14825 (2). ....	40
Tabla 7.5. Extracto de la tabla C.3 Cálculo del PERIODO para el SCOPnet del Anexo C de la norma UNE-EN 14825 (2). ....	41
Tabla 7.6. Factores de carga parcial y temperatura de bulbo seco del aire exterior para el caso de modo refrigeración. Fuente: UNE 14825 (2). ....	43
Tabla 7.7. Tabla B.1 "Datos para el SEER". Fuente: norma UNE 14825 (2).....	43
Tabla 7.8. Extracto de la tabla B.2. "Cálculo del periodo para el SEERon". Fuente: UNE 14825. ....	45
Tabla 8.1. Ejemplo de tabla introducida en Excel. Condiciones clima A, temperatura baja y unidad aire/agua.....	48
Tabla 8.2. Ejemplo de fragmento de tabla C.1.de Excel.....	49



Tabla 8.3. Tabla resumen de las condiciones SI para la obtención de la potencia declarada y el COP <sub>bin</sub> (T <sub>j</sub> ) en caso de que T <sub>j</sub> sea igual a alguna de las temperaturas de las estaciones de calefacción. ....	50
Tabla 8.4. Condición SI para el caso de que T <sub>j</sub> se encuentre por debajo de TOL.....	51
Tabla 8.5. Interpolaciones entre los intervalos G-A, A-B, C-C, C-D para la obtención de la potencia declarada. ....	51
Tabla 8.6. Extrapolación para obtención de la potencia declarada a T <sub>j</sub> mayor que T <sub>D</sub> . ....	51
Tabla 8.7. Ejemplos de interpolaciones para calcular la potencia en función de donde se encuentre T <sub>bivalente</sub> y T <sub>j</sub> . ....	52
Tabla 8.8. Tipología de bomba estudiada y potencia de diseño de la misma. Fuente: Hitachi (13).....	59
Tabla 8.9. Valores de COP <sub>d</sub> , P <sub>d</sub> , T <sub>biv</sub> y TOL para un ejemplo de bomba de calor Hitachi (13).....	60
Tabla 8.10. Extracto de tabla "Heating performance data", para el modelo PUHZ-W50VHA(-BS). Fuente: Ecodan Mitsubishi (14). ....	62
Tabla 8.11. Interpolación de la potencia declarada y del COP para la estación de referencia A.....	64
Tabla 8.12. Datos declarados de la ficha técnica de una bomba de calor aire/aire Mitsubishi. Fuente: Mitsubishi (15). ....	70
Tabla 8.13. Tabla A.4 norma UNE 14825. Número de horas utilizado para el cálculo del SCOP de referencia (2). ....	70
Tabla 8.14. Valores de SCOP para los diferentes climas de una bomba de calor Mitsubishi. Fuente: (15). ....	71
Tabla 8.15. Tabla B.1 de Excel con datos del ejemplo de la norma UNE 14825 (2). ....	73
Tabla 8.16. Número de horas utilizado para el cálculo del SEER de referencia. Fuente: UNE EN 14825 (2). ....	74
Tabla 8.17. Extracto de ficha técnica de bomba de calor Mitsubishi. Fuente: Mitsubishi (15). ....	76
Tabla 8.18. Extracto de ficha técnica de Mitsubishi, datos de potencia para el cálculo del	

SEER de referencia. Fuente: Misubishi (15).....	77
Tabla 9.1. Tabla de partida de costes de personal.....	82
Tabla 9.2. Tabla de costes asociados al equipo informático utilizado. ....	82
Tabla 9.3. Costes asociados al consumo eléctrico.....	83
Tabla 9.4. Costes asociados a recursos de ingeniería. ....	83
Tabla 9.5. Coste total del proyecto. ....	83
Tabla A.1. Parque de bombas de calor por zonas climáticas y sectores año 2014. Fuente: IDAE.....	2
Tabla A.2. Parque de bombas de calor en España por sectores y tipo de máquina térmica, año 2014. Fuente: IDAE.....	2
Tabla C.3. Factores de ponderación para sistemas de calefacción por bomba de calor según el método del IDAE (4). ....	5
Tabla C.4. Factores de corrección (FC) según las temperaturas de condensación, según la temperatura de ensayo del COP. Método publicado por IDAE (4). ....	5

## Índice de gráficas

Gráfica 8.1. Puntos de cálculo para el SCOPon y SCOPnet para una bomba de potencia fija. .....	56
Gráfica 8.2. Puntos de cálculo para el SCOPon y SCOPnet para una bomba de potencia variable.....	57
Gráfica 8.3. Puntos de cálculo para el SCOPon y SCOPnet para una bomba de calor con varias etapas de potencia. ....	58
Gráfica 8.4. Gráfica que compara la carga parcial con la potencia declarada para una bomba de calor Hitachi, modelo RAS-4WHNPE.....	60
Gráfica 8.5. Gráfico de funcionamiento de una bomba de calor de capacidad variable. ....	72
Gráfica 8.6. Representación gráfica de la recta de carga parcial frente a la potencia declarada para el ejemplo de cálculo del Anexo C de la norma UNE (2). ....	77

## 1. Glosario

<b><u>DENOMINACIÓN</u></b>	<b><u>SIGNIFICADO</u></b>
<b>A</b>	Clima medio
<b>C</b>	Clima más frío
<b>Cc</b>	Factor de degradación para unidades aire/agua o agua-salmuera/agua
<b>Cd</b>	Factor de degradación para unidades aire/aire o agua-salmuera/aire
<b>COP</b>	<i>Coefficient Of Performance</i> (Coeficiente de rendimiento) [kW/kW]
<b>COPd</b>	COP a capacidad declarada [kW/kW]
<b>COPbin(Tj)</b>	COP específico del periodo [kW/kW]
<b>CRu</b>	Factor de potencia
<b>EER</b>	<i>Energy Efficiency Ratio</i> (Factor de Eficiencia Energética) [kW/kW]
<b>EERd</b>	EER a capacidad declarada [kW/kW]
<b>EERbin(Tj)</b>	EER específico del periodo [kW/kW]
<b>elbu</b>	Potencia calefactor eléctrico de reserva [kW]
<b>hj</b>	Horas de funcionamiento del periodo [h]
<b>Pd</b>	Potencia declarada [kW]
<b>Pdesignc</b>	Carga completa en modo refrigeración [kW]
<b>Pdesignh</b>	Carga completa en modo calefacción [kW]
<b>Ph(Tj)</b>	Demanda de calefacción a temperatura Tj [°C]
<b>SCOP</b>	<i>Seasonal Coefficient Of Performance</i> (Coeficiente de rendimiento estacional) [kWh/kWh]

<b>SCOPnet</b>	SCOP en modo activo sin calefactor eléctrico de reserva [kWh/kWh]
<b>SCOPon</b>	SCOP en modo activo [kWh/kWh]
<b>SEER</b>	<i>Seasonal Energy Efficiency Ratio</i> (Factor de Eficiencia Energética Estacional) [kWh/kWh]
<b>SEERon</b>	SEER en modo activo [kWh/kWh]
<b>Tbiv, Tbivalente</b>	Temperatura bivalente [°C]
<b>Tdesignc</b>	Temperatura de diseño en modo refrigeración [°C]
<b>Tdesignh</b>	Temperatura de diseño en modo calefacción [°C]
<b>TOL</b>	Temperatura límite de funcionamiento [°C]
<b>W</b>	Clima cálido

## **2. Prefacio**

### **2.1. Origen del proyecto**

Este proyecto se desarrolla a raíz de la experiencia de prácticas en la empresa RDmes Technologies, cuya línea de trabajo se basa en la creación de herramientas técnicas para el apoyo de la ingeniería y mantenimiento de sistemas que hacen servir energías renovables. Es en el marco de este trabajo donde surge la idea de creación de una herramienta de Excel para el cálculo de rendimiento estacional de bombas de calor, apoyándose en la amplia documentación sobre normativa y equipos actuales comercializados de la que dispone la empresa.

### **2.2. Motivación**

El interés por el desarrollo del proyecto se genera a raíz de la información facilitada en las prácticas de empresa. Es entonces donde se observa que en la actualidad no se dispone de ninguna herramienta que realice los cálculos del rendimiento estacional de forma automatizada y para cada caso concreto de bomba de calor del mercado. De esta manera, con el desarrollo de esta herramienta, se espera cubrir una necesidad del mundo laboral, simplificando el trabajo del ingeniero que haya de realizar esta tarea.

### **2.3. Requerimientos previos**

A la hora de desarrollar la herramienta de cálculo, se requieren una serie de conocimientos previos en la temática de estudio. Es necesario un conocimiento base sobre las bombas de calor y cálculo de su rendimiento estacional. Asimismo, se debe de realizar un estudio sobre la normativa vigente en España y el mercado actual del sector (bombas de calor comercializadas e información técnica proporcionada por el fabricante al cliente). Todo ello conjuntamente con unos conocimientos básicos sobre el desarrollo y trabajo en el programa de cálculo Excel. La comprensión de las fórmulas (o funciones) de Excel, así como un cierto entendimiento en la creación y trabajo con Macros, se hace imprescindible para el correcto desarrollo del proyecto.



## **3. Introducción**

### **3.1. Objetivos del proyecto**

Este proyecto aborda la problemática que representa el cálculo del rendimiento estacional para distintas tipologías de bombas de calor, haciendo uso de la metodología de cálculo propuesta en la norma UNE-EN 14825. Por tanto, uno de los principales objetivos del trabajo es el análisis de dicha norma europea, realizando un estudio pormenorizado del contenido de la misma, considerando la tipología de bombas de calor a las cuales es aplicable y las distintas variables que influyen en el método de cálculo. Resulta de especial importancia la comprensión de los conceptos de rendimiento estacional, bien referentes al trabajo de la máquina en modo de calefacción (en invierno) o bien modo de refrigeración (en verano).

Con el propósito de obtener el rendimiento estacional siguiendo la metodología presente en la norma se decide desarrollar una herramienta de cálculo del mismo, haciendo uso del programa Excel. Se pretende que esta herramienta permita al usuario realizar el cálculo de forma exacta para cualquier tipo de bomba de calor que cumpla las condiciones establecidas en la norma UNE, por tanto se ha de realizar un estudio de las distintas bombas de calor existentes en el mercado y crear una herramienta que permita la obtención del rendimiento estacional para todas ellas. El objetivo es, por tanto, realizar un programa capaz de calcular de forma exacta el valor del rendimiento estacional de una bomba de calor independientemente de los datos proporcionados por el fabricante acerca de la misma.

Adicionalmente, se pretende que esta herramienta de cálculo resulte de uso sencillo para el usuario, esto es, que un usuario con conocimientos básicos en la temática a tratar pueda realizar los cálculos sin necesidad de un gran esfuerzo de comprensión de los procedimientos seguidos en el Excel. Por lo tanto, se deduce que uno de los principales objetivos a llevar a cabo en la confección del programa es la de elaboración de una herramienta con cálculos sencillos y comprensibles, y al mismo tiempo aplicables a diferentes equipos y fabricantes del sector. Asimismo, con el propósito de simplificar la labor del usuario, se trata de minimizar el número de interacciones del programa con él, esto es, que el programa se comporte de forma automatizada sin necesidad de que el usuario intervenga, excepto a la hora de introducir los datos de la máquina térmica en el Excel.

### **3.2. Alcance del proyecto**

El siguiente Trabajo Fin de Máster basa su desarrollo en la creación de una herramienta de Excel que permita la obtención de valores de rendimiento estacional para bombas de calor



comercializadas en la actualidad, centrandose especialmente la atención en el mercado español. Es por esta razón que el campo de aplicación de dicho programa es muy extenso. No obstante, se pueden establecer ciertos límites en lo que respecta al alcance del trabajo.

En primer lugar, el proyecto se centra en la aplicación de la metodología de cálculo propuesta por la norma UNE-EN 14825, la cual es aplicable a bombas de calor con compresor accionado eléctricamente, excluyendo por lo tanto del cálculo cualquier tipología de máquina térmica que no cumpla este requisito. Adicionalmente, los datos utilizados de número de horas por periodo, necesarios para llevar a cabo los cálculos, son los correspondientes a máquinas térmicas de potencia igual o inferior a 12 kW. En el caso que la potencia de la máquina térmica supere este valor, se habrá de comprobar si los resultados de número de horas utilizados son los adecuados o, en cambio, se han de sustituir por otros.

En cuanto al campo de aplicación de la herramienta de Excel, se ha confeccionado el programa de manera que calcule el rendimiento estacional para cualquier máquina térmica del mercado bajo las condiciones citadas. No obstante, se ha de tener en cuenta que la diversidad de bombas de calor del mercado es extensa y la tecnología se encuentra en constante avance, de manera que existe la posibilidad de que a corto plazo puedan encontrarse casos concretos para el cálculo de los cuales el programa necesite una ligera modificación. No obstante se pretende que la herramienta sea dinámica y esté abierta a posibles modificaciones por parte de un usuario que necesite ampliaciones de las funciones de la misma.

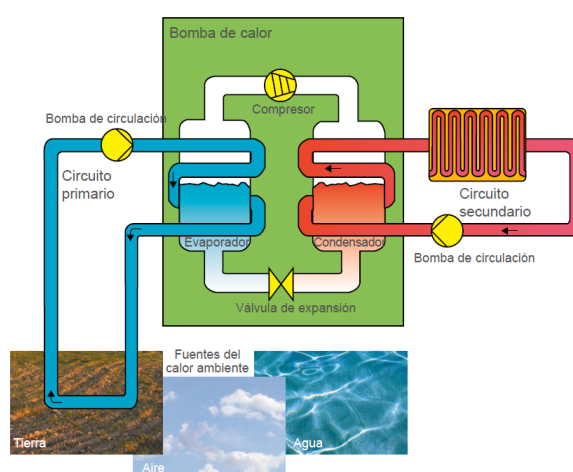
## 4. Bomba de calor

Este Trabajo Fin de Máster focaliza su trabajo en el cálculo de rendimientos para máquinas térmicas de la tipología bomba de calor. Por ello, se considera de especial importancia la realización de un estudio previo sobre dichas máquinas, analizando aspectos como su funcionamiento y tipología, así como otros parámetros relevantes para el cálculo de rendimientos. A continuación se presenta un breve informe sobre las características más destacadas de las bombas de calor.

### 4.1. Definición y funcionamiento

Una bomba de calor se define como una máquina térmica que, siguiendo un ciclo termodinámico cerrado, transfiere calor del entorno (aire, agua o tierra) a un edificio o instalación industrial, por medio de un gas refrigerante que fluye desde una temperatura más baja a otra más alta. El calor es extraído de una fuente (renovable) de energía por medio de un evaporador, y se transmite a través de un condensador a un foco de alta temperatura.

Se trata de una máquina inversa, esto es, con la posibilidad de funcionar en dos modos, modo calefacción (el correspondiente a la definición previa y también llamado modo bomba de calor), y modo refrigeración (intercambia el calor del recinto con el exterior, refrigerando el interior del mismo). La inversión del ciclo se consigue mediante una válvula de 4 vías, de tal forma que no es necesario cambiar los elementos (evaporador y condensador) de posición según el modo de funcionamiento, sino que tan solo es necesario modificar las conexiones mediante dicha válvula. En la Figura 4.1 se muestra el esquema de funcionamiento de una bomba de calor para el modo calefacción.



**Figura 4.1. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor en modo calefacción (1).**

Dependiendo del modo de funcionamiento en el que funcione la bomba de calor, el sistema

que actuará como unidad interior o exterior (el evaporador y el condensador), será diferente:

**Tabla 4.1. Unidad interior y exterior de una bomba de calor en función del modo de funcionamiento.**

Modo funcionamiento	Unidad Exterior	Unidad Interior
Modo calefacción	Evaporador	Condensador
Modo refrigeración	Condensador	Evaporador

La disposición de las unidades según el modo de funcionamiento señalada en la Tabla 4.1 se comprueba en la Figura 4.1, donde la unidad exterior es el evaporador y la interior el condensador.

Cabe destacar que en el transcurso de este proceso tiene lugar un intercambio de energía (en forma de calor), pero que no existe intercambio del fluido de trabajo entre la unidad interior y la exterior (ciclo termodinámico cerrado).

## 4.2. Tipologías de bombas de calor

Existen diferentes criterios de clasificación de las bombas de calor, atendiendo a distintos aspectos, tales como el medio de intercambio de calor, su construcción, etcétera. A continuación, se muestran brevemente algunas de las clasificaciones más destacadas:

### 4.2.1. Según el medio que intercambia calor con el exterior y el medio que absorbe calor

De acuerdo con la AFEC (Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización), las bombas de calor se clasifican atendiendo al fluido caloportador. De esta manera se diferencia entre sistemas de aire y sistemas de agua.

- **Sistemas de aire:**

El medio al cual se transfiere el calor de la máquina térmica es el aire, y el intercambio de calor con el exterior puede realizarse mediante aire o agua. De esta manera se distinguen dos subclases de sistemas de aire: aire-aire, agua-aire.

Las bombas de calor aire-aire son ampliamente utilizadas, comparativamente con cualquier otra tipología de bomba de calor, el porcentaje de instalación de estas es mucho mayor.

Existe la posibilidad de generar calefacción o aire acondicionado, de tal forma que el sistema aportará al local aire caliente o frío según el caso.

- **Sistemas de agua:**

La climatización del recinto se lleva a cabo mediante un fluido caloportador intermedio (agua caliente o fría). En este caso se diferencia entre dos sistemas: aire-agua o agua-agua (o también salmuera-agua, en caso de que el agua presente una cierta concentración de sal disuelta).

En modo calefacción el agua alcanza una temperatura de entre 30 y 65°C, mientras que en refrigeración el rango se localiza entre 7 y 20°C. El intercambio de calor se produce en las unidades terminales, tales como ventiloconvectores o fancoils, radiadores de alta o baja temperatura, suelo radiante, etcétera; a los cuales llega el agua mediante un sistema de tuberías.

- **Sistemas geotérmicos:**

Representan el sistema menos utilizado de bomba de calor en España, debido a su coste elevado y a la necesidad de grandes superficies de terreno. Dicho sistema aprovecha la energía de una fuente geotermal (sistemas del tipo tierra-aire o tierra-agua).

#### **4.2.2. Según el proceso llevado a cabo**

De acuerdo con el modo de accionamiento de la bomba de calor se diferencia entre varios tipos de máquina térmica:

- **Bomba de calor con compresor impulsado mecánicamente:**

La impulsión se lleva a cabo con un compresor accionado por un motor de tipo eléctrico (bombas con motor eléctrico), o por un motor de combustión de gas (bombas de motor de gas).

- **Bomba de calor de accionamiento térmico:**

También llamada bomba de calor por absorción. Mediante temperaturas elevadas se produce el calor que impulsará el ciclo.

- **Bombas de calor electrotérmicas:**

Funcionan mediante el efecto Peltier, el cual se basa el calentamiento y enfriamiento de dos metales soldados (uno se calienta y otro se enfría) por medio de la aplicación de una corriente eléctrica.

#### 4.2.3. Según su construcción

Los equipos utilizados para la bomba de calor pueden ser del tipo compacto o partido:

- **Sistema compacto:**

Dentro de una misma carcasa se encuentran todos los elementos constituyentes de la bomba de calor.

- **Split:**

El sistema se encuentra subdividido en dos partes, uno exterior y otro interior.

- **Multi-Split:**

Una única unidad exterior instalada y múltiples unidades interiores.

- **VRF (Variable Refrigerant Flow):**

Existe un número variable de unidades interiores de expansión directa conectadas a una o varias unidades exteriores. Este sistema es resultado de la evolución de los sistemas Multi-Split. Diferenciándolo de la bomba de calor convencional, tiene la capacidad de variar el caudal de refrigerante aportado. De esta manera se alcanza un control más preciso de las condiciones de temperatura.

También llamados VRV (volumen de refrigerante variable), aunque este término no es tan preciso ya que el control se realiza sobre el flujo de refrigerante; esto es, el caudal, no el volumen.

El funcionamiento de este tipo de sistemas se basa en la incorporación de un sistema de variación de frecuencia en el motor del compresor. De esta manera el compresor trabajará a mayor o menor potencia de acuerdo con las necesidades del local. A bajas potencias de trabajo del compresor el caudal de refrigerante suministrado será más bajo.

Este sistema de control frecuencial disminuye el desgaste del compresor, ya que el número de paros y puestas en funcionamiento será menor con respecto al sistema convencional.

#### 4.2.4. Según su funcionamiento

- **Reversibles:**

Pueden funcionar tanto para calefacción como para refrigeración, según las necesidades. En la actualidad representan la gran mayoría de bombas de calor instaladas en España.

- **No reversibles:**

Tienen un único modo de funcionamiento, calefacción.

- **Termofrigobombas:**

Producción simultánea de frío y calor.

## 5. Conceptos básicos

En el siguiente apartado se definen los principales términos y conceptos de relevancia en relación al cálculo de la eficiencia de las bombas de calor. Para la correcta explicación de estos términos se diferenciará entre dos tipologías de valores, los puntuales y los estacionarios. Los primeros son referidos a valores instantáneos, mientras que los segundos tienen en consideración la variación de las condiciones de cálculo con el tiempo.

### 5.1. Valores puntuales

#### 5.1.1. COP (Coefficient Of Performance)

Uno de los parámetros de mayor relevancia, en lo referente a la eficiencia de las bombas de calor, es el COP, el coeficiente de eficiencia energética en modo calefacción, que se define como el cociente entre la potencia de calefacción (Q) y la potencia eléctrica absorbida a plena carga y en unas condiciones de temperatura específicas (W).

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (\text{Ec. 1})$$

Para el caso de bombas de calor, el COP ideal viene dado por el ciclo de Carnot, respondiendo a la expresión:

$$COP_{ideal} = \frac{T_c}{T_c - T_f} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde se observa que el COP ideal viene determinado mediante las temperaturas de los focos, de forma que  $T_c$  representa la temperatura del foco caliente (la de cesión de calor) y  $T_f$  la del foco frío (el que absorbe calor).

#### 5.1.2. EER (Energy Efficiency Ratio)

El factor de eficiencia energética en modo refrigeración se define como el cociente entre la potencia de refrigeración y la potencia eléctrica absorbida con la unidad a plena carga y unas condiciones de temperatura específicas.

Los dos parámetros citados anteriormente, el COP y el EER, son certificados por el fabricante en condiciones de plena carga, esto es, cuando la máquina suministra el 100% de la potencia. Pero existen muchas situaciones en las que esto no ocurre, ya que a día de hoy es muy común que los equipos regulen el régimen de giro del compresor con el fin de

adaptarse a la demanda. Por esta razón, los dos coeficientes mencionados están siendo sustituidos por otros dos, el SCOP y el SEER, que sí tienen en cuenta estas variaciones de carga.

## 5.2. Valores estacionales

### 5.2.1. SCOPnet según norma UNE 14825-2014

La norma europea (2) señala los métodos de cálculo del Coeficiente de Rendimiento Estacional SCOP, SCOPon y SCOPnet.

El documento define el SCOPnet como la eficiencia energética estacional de una unidad en modo activo de calefacción sin calefactores eléctricos suplementarios. La propia norma indica las condiciones obligatorias de determinación de dicho parámetro.

$$SCOP_{net} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j \cdot (Ph(T_j) - elbu(T_j))}{\sum_{j=1}^n h_j \cdot \left( \frac{Ph(T_j) - elbu(T_j)}{COP_{bin}(T_j)} \right)} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

- $T_j$  es la temperatura del periodo.
- $j$  es el número del periodo.
- $n$  es la cantidad de periodos.
- $Ph(T_j)$  es la demanda de calefacción del edificio para la temperatura  $T_j$  correspondiente, expresada en kW.
- $h_j$  es el número de horas del periodo que suceden a temperatura  $T_j$  correspondiente.
- $COP_{bin}(T_j)$  son los valores COP de la unidad para la temperatura  $T_j$  correspondiente.
- $elbu(T_j)$  es la potencia requerida de un calefactor eléctrico de reserva para la temperatura  $T_j$  correspondiente, expresada en kW.

Los valores de  $j$ ,  $T_j$  y  $h_j$  son proporcionados por la norma UNE en el Anexo A de la misma.

En lo referente a la demanda de calefacción  $Ph(T_j)$  se obtiene del producto del valor a carga



completa ( $P_{designh}$ ) y el factor de cada parcial para cada periodo. Dicho factor presentará un valor dependiente del clima, tal como se muestra en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1. Factor de carga parcial según clima. Fuente: norma UNE EN 14825.**

Clima	Factor de carga parcial (%)
Medio	$(T_j - 16)/(-10 - 16)$
Más cálido	$(T_j - 16)/(2 - 16)$
Más frío	$(T_j - 16)/(-22 - 16)$

Para obtener los valores de  $COP_{bin}(T_j)$  y de potencia de cada periodo se ha de realizar una interpolación entre los valores de  $COP_{bin}(T_j)$  para la condiciones de carga parcial A, B, C, D, E, F y G según corresponda (interpolación entre los valores más próximos para cada caso). En el caso de que las condiciones del periodo sean superiores a D se ha realizar una extrapolación con las condiciones C y D.

Este concepto de SCOPnet, para el caso de España, recibe también el nombre de SPF, y el IDAE propone un método de cálculo del mismo diferente al de la UNE, tal como se explica en el Anexo C de este proyecto.

### 5.2.2. SCOPon (Coeficiente de rendimiento estacional en modo activo)

La norma UNE 14825-2014 define el método de cálculo del coeficiente de rendimiento medio estacional de la unidad en modo activo para la estación de calefacción designada, a partir del coeficiente de rendimiento a carga parcial, el coeficiente de potencia calorífica del dispositivo de calefacción eléctrica de reserva (cuando sea requerido) y de los coeficientes de rendimiento específicos del periodo ( $COP_{bin}(T_j)$ ). Todo ello ponderado por medio de las horas por periodo en las condiciones de dicho periodo.

$$SCOP_{on} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j \cdot Ph(T_j)}{\sum_{j=1}^n h_j \cdot \left( \frac{Ph(T_j) - elbu(T_j)}{COP_{bin}(T_j)} + elbu(T_j) \right)} \quad (Ec. 4)$$

Donde todos los parámetros utilizados han sido definidos previamente para el cálculo del SCOPnet 5.2.1.

### 5.2.3. SCOP (Seasonal Coefficient Of Performance)

El Coeficiente de rendimiento estacional se define como la relación entre la demanda de calefacción y el consumo de electricidad, en modo calefacción, anual.

La norma UNE propone una expresión para calcularla:

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}} = \frac{P_{designh} \times H_{HE}}{\frac{P_{designh} \times H_{HE}}{SCOP_{on}} + H_{TO} \times P_{TO} + H_{SB} \times P_{SB} + H_{CK} \times P_{CK} + H_{OFF} \times P_{OFF}} \quad (Ec. 5)$$

Donde:

- $Q_H$  es la demanda de calefacción anual de referencia (kWh).
- $Q_{HE}$  es el consumo eléctrico anual (kWh).
- $P_{designh}$  representa la carga completa de calefacción.
- $H_{TO}$ ,  $H_{SB}$ ,  $H_{CK}$ ,  $H_{OFF}$  son el número de horas considerado durante los cuales la unidad trabaja en modo desactivado del termostato, modo de espera, modo de dispositivo de calentamiento del cárter y modo desactivado.
- $P_{TO}$ ,  $P_{SB}$ ,  $P_{CK}$ ,  $P_{OFF}$  es el consumo eléctrico durante los modos mencionados, expresado en kW.

Es importante comprender la diferencia entre el COP y el SCOP. El primer término se refiere a un cociente de potencias, y por tanto el valor del rendimiento es del tipo instantáneo, independiente del tiempo. En este caso se supone que la máquina térmica funcionará siempre aportando el 100% de su capacidad. No obstante, con el desarrollo de la tecnología de tipo Inverter, que permite la regulación del consumo, este parámetro de COP no define correctamente el comportamiento de la máquina, ya que considera siempre plena carga cuando en realidad la máquina trabajará a distintas cargas parciales. Por el contrario el SCOP, tal como su nombre indica, es estacional, obteniéndose a partir del consumo energético de la máquina funcionando a distintas condiciones de carga. De esta manera, con la tecnología actual de bomba de calor, el parámetro del SCOP define con mayor exactitud el comportamiento de las mismas.

#### 5.2.4. SEERon (Factor de eficiencia energética estacional en modo activo de refrigeración)

De acuerdo con la norma europea, es un parámetro establecido a partir del factor de eficiencia energética a carga parcial específico del periodo ( $EER_{bin}(T_j)$ ) y ponderado con la ayuda de las horas por periodo en las condiciones del periodo.

$$SEER_{on} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j \times P_c(T_j)}{\sum_{j=1}^h \left( \frac{P_c(T_j)}{EER_{bin}(T_j)} \right)} \quad (Ec. 6)$$

Los valores de  $j$ ,  $T_j$  y  $h_j$  son determinados en el anexo de la norma UNE.  $P_c(T_j)$ , la demanda de refrigeración, se determina multiplicando el valor de carga completa ( $P_{designc}$ ) por el factor de carga parcial correspondiente. Este valor se obtiene de la forma:

$$\text{Factor de carga parcial \%} = (T_j - 16)/(35 - 16) \quad (\text{Ec. 7})$$

### 5.2.5. SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio)

El factor de eficiencia energética estacional se define como el factor de eficiencia energética global de la unidad. Se trata de un factor representativo de toda la temporada de refrigeración, y se calcula como la demanda anual de refrigeración de referencia dividida por el consumo anual de electricidad para refrigeración.

La norma UNE EN 14825 propone una expresión para su cálculo:

$$SEER = \frac{Q_C}{Q_{CE}} = \frac{P_{designc} \times H_{CE}}{\frac{Q_C}{SEER_{on}} + H_{TO} \times P_{TO} + H_{SB} \times P_{SB} + H_{CK} \times P_{CK} + H_{OFF} \times P_{OFF}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

- $Q_C$  representa la demanda anual de refrigeración de referencia (kWh).
- $Q_{CE}$  se refiere al consumo eléctrico anual de referencia (kWh).

Los demás parámetros de la fórmula se han explicado en el anterior apartado 5.2.3.

De forma análoga a como ocurre en caso del COP y el SCOP, las diferencias entre el EER y el SEER se basan en el carácter instantáneo de las primeras, frente al temporal de las segundas. Con la tecnología actual de bomba de calor, que permite el trabajo a distintas condiciones de carga, y no tan solo a plena carga, el parámetro puede definir de forma más adecuada el ratio de eficiencia es aquel que tiene en cuenta dichas variaciones de carga, esto es, el SEER.

## 5.3. Bomba de calor como energía renovable

El uso y aprovechamiento de la energía es un tema ampliamente estudiado y discutido por la sociedad actual, principalmente en lo que respecta al origen de dicha energía, surgiendo una creciente preocupación por el medioambiente y el cambio climático. Es por ello que la Unión Europea está tomando medidas para la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Una de ellas es el establecimiento de tres objetivos clave para el año 2020:

- Reducción del 20% de las emisiones, con respecto al año 1990, de gases de efecto invernadero (principalmente CO<sub>2</sub>).
- Promoción de las energías renovables. Un 20 % del consumo total de energía ha de proceder de energías renovables.
- Aumento de la eficiencia energética hasta alcanzar un ahorro del 20 % del consumo de energía.

Una de las principales ventajas que presenta la bomba de calor es el hecho de que en determinadas condiciones puede ser considerada como energía renovable, resultando este hecho de especial interés para la aplicación de los objetivos mencionados.

La directiva 2009/28/CE (3), que será comentada posteriormente en el apartado 6.3 de normativa, del parlamento Europeo, establece un método de cálculo para la consideración de una bomba de calor como energía renovable a partir de determinados valores de rendimiento. Adicionalmente a esta directiva, el documento “Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor para la producción de calor en edificios” (4), que igualmente será explicado posteriormente en el capítulo 6.2, establece una metodología de determinación de, según la tipología y ubicación de la bomba de calor, el valor de rendimiento adecuado para la consideración de producción de energía térmica procedente de energía de tipo renovable. El escrito, en un anexo, muestra diferentes tablas obtenidas con los valores mínimos de COP para la consideración de energía renovable.

Un extracto de tabla de este documento, a modo explicativo, se muestra a continuación:

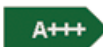
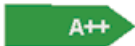






**Tabla 5.2. COP mínimo necesario para la consideración de energía renovable en función la aplicación y de la zona climática. Fuente: IDAE (4).**

Fuente Energética de la bomba de calor	COP mínimo para calefacción a 40°C				
	A	B	C	D	E
Energía Aerotérmica Equipos centralizados	3,31	3,58	3,58	3,84	3,84
Energía Aerotérmica Equipos individuales tipo split	4,35	4,21	4,21	4,50	4,50
Energía Hidrotérmica	2,90	3,00	3,11	3,35	3,58
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores horizontales	2,75	2,84	2,97	3,19	3,39
Energía Geotérmica de circuito cerrado. Intercambiadores verticales	2,31	2,33	2,44	2,59	2,78
Energía Geotérmica de circuito abierto	2,20	2,21	2,33	2,46	2,64

La directiva europea 2010/30/UE (5), en vigor desde 2013, establece unos parámetros de

clasificación energética de los equipos de climatización de hasta 12 kW. Se trata de un modelo más estricto de clasificación, que utiliza como valores de partida los resultados del SCOP y SEER (que serán explicados en detalle en los apartados 5.2.3 y 5.2.5). De esta manera se presenta la Tabla 5.3, con las diferentes clases de eficiencia energética.

**Tabla 5.3. Tabla coeficientes energéticos 2013. Fuente: Reglamento delegado UE (6).**

		<b>SEER</b>	<b>SCOP</b>
	<b>A+++</b>	SEER $\geq$ 8,50	SCOP $\geq$ 5,10
	<b>A++</b>	6,10 $\leq$ SEER < 8,50	4,60 $\leq$ SCOP < 5,10
	<b>A+</b>	5,60 $\leq$ SEER < 6,10	4,00 $\leq$ SCOP < 4,60
	<b>A</b>	5,10 $\leq$ SEER < 5,60	3,40 $\leq$ SCOP < 4,00
	<b>B</b>	4,60 $\leq$ SEER < 5,10	3,10 $\leq$ SCOP < 3,40
	<b>C</b>	4,10 $\leq$ SEER < 4,60	2,80 $\leq$ SCOP < 3,10
	<b>D</b>	3,60 $\leq$ SEER < 4,10	2,50 $\leq$ SCOP < 2,80
	<b>E</b>	3,10 $\leq$ SEER < 3,60	2,20 $\leq$ SCOP < 2,50
	<b>F</b>	2,60 $\leq$ SEER < 3,10	1,90 $\leq$ SCOP < 2,20
	<b>G</b>	SEER < 2,60	SCOP < 1,90

Los fabricantes han de incluir en las fichas técnicas de sus bombas de calor la etiqueta energética correspondiente, para informar al usuario de manera simple de la eficiencia de la máquina.

En esta clasificación de los coeficientes energéticos se tienen en consideración diversos aspectos no considerados en el caso del IDAE, tales como el consumo de acuerdo a las tres zonas climáticas en la UE para la modalidad de calefacción (zona cálida, media y fría), el hecho de que el sistema pueda funcionar a carga parcial, así como el consumo cuando el sistema está desactivado.

El hecho de que las bombas de calor puedan ser clasificadas como fuentes de energía renovable incrementa el potencial de uso e instalación de las mismas, aumentando las posibilidades de que los usuarios se interesen por ellas y las elijan en contraposición a otras alternativas. Todo ello teniendo en consideración los rendimientos límite a partir de los cuales se puede considerar como una fuente renovable.

## 6. Contexto normativo

El presente trabajo realiza un estudio pormenorizado y focalizado de la norma UNE 14825-2014, no obstante, en la actualidad existe una cierta diversidad de normativa dentro de la temática referente a las bombas de calor. Se ha considerado necesario añadir en este proyecto un apartado en el que se comente brevemente dicha normativa, ya que afecta de forma directa o indirecta al campo de estudio objeto de este Trabajo Fin de Máster.

De esta manera, en el ámbito español y europeo se ha publicado a lo largo de los años legislación que estudia la temática de la bomba de calor. En lo referente a las normas UNE, cabe destacar que se trata de especificaciones técnicas, de carácter no obligatorio (a excepción de alguna disposición legal en la cual se prescriba el obligado cumplimiento en algún caso concreto).

### 6.1. Normas UNE

- **UNE EN 14511:2014**

Esta norma UNE (7) estudia la casuística de acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para calefacción y refrigeración de locales. En ella se estudia la evaluación y determinación de los rendimientos de dichas máquinas. La norma está dividida en cuatro capítulos principales: Términos, Condiciones y Métodos de ensayo, Requisitos de funcionamiento, marcado e instrucciones.

- **UNE EN 14825:2014**

Es la norma objeto de estudio en este proyecto, y a lo largo del mismo se comentan de forma detallada los diferentes apartados de la misma relacionados directamente con el proceso de cálculo del rendimiento estacional. Estudia los acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y la refrigeración de locales.

Esta norma es aplicada a unidades producidas en fábrica, definidas en la norma EN 14511, documento de consulta indispensable para la aplicación de la norma.

En el documento se proporcionan las condiciones de carga parcial, así como los métodos de cálculo para la obtención del Factor de Eficiencia Energética Estacional (SEERon) y el Coeficiente de Rendimiento Estacional (SCOPon y SCOPnet).

- **UNE EN 15316-4-2**

Esta norma UNE (8) se aplica a los sistemas de calefacción en los edificios. En el texto se presenta el método de cálculo de los requisitos de energía del sistema, así como la eficiencia del mismo. Concretamente el apartado 4-2 estudia los sistemas de generación para calefacción de locales mediante bomba de calor.

Dicho documento estudia la temática de las bombas de calor utilizadas para calefacción de locales, para los calentadores de agua y producción de agua caliente sanitaria. Estas bombas de calor pueden ser del tipo ciclo de compresión de vapor accionadas eléctricamente, mediante ciclo de compresión de vapor accionadas por un motor de combustión o mediante ciclo de absorción de vapor accionadas térmicamente.

- **UNE EN 16147:2011**

Esta norma (9) estudia, para ACS, las bombas de calor con compresor accionado eléctricamente. Especifica los métodos de ensayo y requisitos para el marcado de bombas de calor aire/agua, salmuera/agua, agua/agua e intercambio directo/agua en el caso de compresores accionados eléctricamente conectados o que incluyan un depósito acumulador de agua caliente sanitaria.

## **6.2. Legislación nacional**

En el contexto español se han publicado una serie de documentos que resultan de importancia en lo que respecta a las bombas de calor.

De esta forma cabe destacar el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006. Concretamente la orden FOM/1635/2013 (10), en la cual se revisa y actualiza el Documento Básico DB-HE “Ahorro de Energía”. En el documento se ofrece la posibilidad de sustituir la instalación con energía solar térmica (para el caso de climatización o agua caliente sanitaria para piscinas cubiertas) por otra procedente de una fuente también renovable. Es este apartado el que permite entonces la instalación de una bomba de calor:

*“La contribución solar mínima para ACS y/o climatización de piscinas cubiertas podrá sustituirse parcial o totalmente mediante una instalación alternativa de otras energías renovables, procesos de cogeneración o fuentes de energía residuales procedentes de la instalación de recuperadores de calor ajenos a la propia instalación térmica del edificio; bien realizada en el propio edificio o bien a través de la conexión a una red de climatización urbana.” (10)*

No obstante añade, que para justificar dicha sustitución, se ha de documentar que las

emisiones de dióxido de carbono, así como el consumo de energía primaria no renovable ocasionados por la instalación alternativa no supere los valores que se obtendrían en el caso de que sí se hubiese realizado la instalación solar térmica.

El RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios), aprobado por el Real Decreto 1027/2007, del 20 de julio, también resulta de relevancia. Dicho documento expone unas condiciones similares al CTE, permitiendo la instalación de fuentes renovables alternativas, pero con la consideración de unas exigencias mínimas de emisión de dióxido de carbono y consumo de energía primaria.

*“Se podrán adoptar soluciones alternativas, siempre que se justifique documentalmente que la instalación térmica proyectada satisface las exigencias básicas de esta sección porque sus prestaciones son, al menos, equivalentes a las que se obtendrían por la aplicación directa del procedimiento simplificado.”(11)*

*“El cumplimiento de las exigencias mínimas se producirá cuando el consumo de energía primaria y las emisiones de dióxido de carbono de la instalación evaluada sea inferior o igual que la de la instalación que cumpla con las exigencias del procedimiento simplificado.”(11)*

Adicionalmente, uno de los documentos que resultan de mayor interés para el caso concreto de cálculo de rendimiento de bombas de calor accionadas eléctricamente del cual trata este trabajo, es el presentado por el IDAE:

- **Documento “Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor para producción de calor en edificios”:**

Documento elaborado por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, empleando como medio el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE). El objetivo del mismo es el establecimiento de una tecnología de cálculo para que las bombas de calor accionadas eléctricamente puedan considerarse como bombas de calor renovable (4).

Ya se ha comentado este escrito a lo largo de este trabajo, y en el Anexo C se explica el método de cálculo del SPF.



### 6.3. Legislación europea

En el ámbito europeo destacan una serie de directivas referentes al fomento y consumo de energías renovables en la UE.

- **Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 23 de abril de 2009**

Esta directiva (3) es relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, y ya se ha comentado previamente en este proyecto en el apartado 5.3, en el cual se explicaba la clasificación de las bombas de calor como energías renovables. El objetivo es el establecimiento de un marco común para la tarea de fomento de las energías limpias, fijando el objetivo de alcanzar en el año 2020 una cuota del 20% de energía procedente de fuentes renovables dentro del consumo total de energía de la Unión Europea. Enmarcadas dentro de estas energías se encuentran la aerotérmica, geotérmica e hidrotérmica, entre otras.

De esta manera, se reconoce como energía renovable la capturada por las bombas de calor en determinadas condiciones. Concretamente, aquellas en las que la producción final de energía supere de forma significativa el consumo de energía primaria necesaria para impulsar la bomba de calor.

*“La energía aerotérmica, geotérmica e hidrotérmica capturada por las bombas de calor se tendrá en cuenta siempre que la producción final de energía supere de forma significativa el insumo de energía primaria necesaria para impulsar la bomba de calor. La cantidad de calor que se ha de considerar como energía procedente de fuentes renovables a efectos de la presente Directiva se calculará de conformidad con la metodología establecida.” (3)*

Se establece que el SPF (factor de rendimiento medio anual estimativo para bombas de calor) ha de ser superior a  $1,15 \cdot 1/\eta$ , siendo el  $\eta$  la eficiencia del sistema de energía. El valor de dicho parámetro es establecido por la Decisión de la Comisión de 1 de marzo de 2013 (2013/114/UE).

*“El anexo de la presente Decisión establece las directrices para el cálculo de la producción de energía renovable procedente de diversas tecnologías de bombas de calor, conforme a lo dispuesto en el anexo VII de la Directiva 2009/28/CE.” (12)*

Así, para el caso de bombas de calor accionadas eléctricamente se consideran renovables aquellas con un  $SPF > 2,5$ , refiriéndose el SPF al SCOPnet (norma EN 14825). Mientras que aquellas accionadas mediante energía térmica se considerarán renovables a partir de un  $SPF > 1,15$ , siendo en este caso el SPF el SPERnet (norma EN 12309).

## 7. Metodología de cálculo según UNE 14825

Para realizar el cálculo del rendimiento estacional de una bomba de calor accionada eléctricamente se ha de seguir la metodología presentada en la norma UNE-EN 14825, tal como se ha comentado en apartados anteriores. Dicho procedimiento se realizará de diferente manera dependiendo del modo de funcionamiento de la bomba de calor estudiado, esto es, calefacción o refrigeración (en modo calefacción se calculará el SCOP de referencia, mientras que en modo refrigeración se buscará obtener el SEER de referencia). A continuación se presenta una explicación detallada de los parámetros y condiciones necesarias para el cálculo, que han sido aplicadas para la elaboración de la herramienta de Excel.

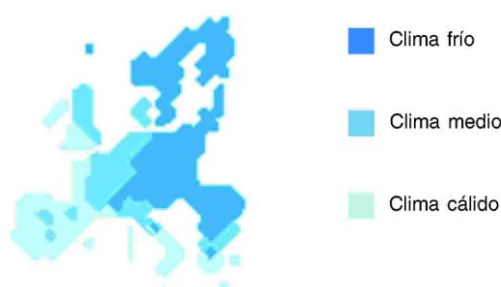
### 7.1. Cálculo en modo calefacción

Con el objeto de realizar el cálculo del SCOP, SCOPon y SCOPnet de referencia de una bomba de calor disponible en el mercado, la norma UNE 14825 señala una serie de parámetros o características de dicha bomba, a partir de las cuales se determinan las condiciones y los valores de temperatura interior necesarios para el cálculo. Dichos parámetros fundamentales son tres: el clima, la temperatura y el tipo de unidad.

#### a) Zona climática

Se definen tres condiciones o estaciones de calefacción de referencia diferentes: A (media), W (más cálida) y C (más fría).

Las zonas climáticas en Europa son definidas tal como se muestra en la Ilustración 7.1. En ella se observa que España presenta una tipología de clima cálido.



**Ilustración 7.1. Zonas climáticas Europa. Fuente: Reglamento Delegado Nº 626/2011 (6).**

Estas condiciones serán las que determinarán los valores de la temperatura de diseño ( $T_{designh}$ ) y acotarán en un rango los de la temperatura bivalente ( $T_{bivalente}$ ).

Así, la temperatura de diseño tomará los valores siguientes:

- Tdesign “media”: Las condiciones de temperatura de bulbo seco estarán a una temperatura exterior de -10°C (-11°C para el caso de bulbo húmedo) y 20°C de temperatura interior.
- Tdesign “más fría”: Las condiciones de temperatura de bulbo seco se encontrarán a una temperatura exterior de -22°C (-23°C para el caso de bulbo húmedo) y 20°C de temperatura interior.
- Tdesign “más cálida”: Las condiciones de temperatura de bulbo seco serán a una temperatura exterior de +2°C (1°C para el caso de bulbo húmedo) y 20°C de temperatura interior.

Para el caso de la temperatura bivalente (temperatura a partir de la cual la máquina térmica cubre el 100% de la demanda), se definirá de acuerdo con el siguiente criterio:

- En el caso de la estación de calefacción media, la temperatura bivalente de bulbo seco tendrá una temperatura de +2°C o menor.
- En el caso de la estación de calefacción más fría, la temperatura bivalente de bulbo presentará un valor de -7°C o inferior.
- En el caso de la estación de calefacción más cálida, la temperatura bivalente de bulbo seco tomará un valor de +7°C o menor.

En la Tabla 7.1 se muestra de forma resumida el valor de estas temperaturas en función de la zona climática objeto de estudio.

**Tabla 7.1. Tabla de temperaturas según la estación de referencia. Fuente: UNE EN 14825 (2).**

Clima	Tdesignh exterior bulbo seco (°C)	Tdesignh exterior bulbo húmedo (°C)	Tdesignh interior (°C)	Tbivalente (°C)
A	-10	-11	20	2 o <
W	2	1	20	7 o <
C	-22	-23	20	-7 o <

#### ***b) Tipo de unidad***

Este parámetro se refiere a la tipología de bomba de calor utilizada, atendiendo al medio que intercambia calor con el exterior y el medio que absorbe calor. Así, la norma señala distintas posibilidades: bomba de calor aire/aire, agua/aire, aire/agua y agua-salmuera/agua

(existen otras tecnologías de bomba de calor, tal como las geotérmicas, pero que no se contemplan en esta norma concreta).

Se observa que al enumerar las tecnologías estas constan de dos elementos definitorios. La primera palabra se refiere al medio a través del cual puede realizarse el intercambio de calor con el exterior. Por ejemplo, para el caso de una bomba de calor agua/aire, el intercambio de calor se realiza mediante agua. En el caso del segundo término se trata del medio al cual se transfiere el calor de la máquina térmica. Así, para el ejemplo anterior, dicho medio sería el aire.

### **c) Temperatura**

Adicionalmente al clima, se definen una serie de temperaturas de funcionamiento que también son determinantes a la hora de calcular el SCOP de referencia. Estas temperaturas serán la estándar (20°C), baja (35°C), media (45°C), alta (55°C) o muy alta (65°C).

Según la tecnología de trabajo existe un rango de temperaturas dentro de los cuales la máquina térmica puede trabajar. Así se observa lo siguiente:

- Las unidades aire/aire o agua/aire trabajan a temperatura estándar (20°C).
- Las unidades aire/agua, agua/agua o salmuera/agua pueden trabajar a temperatura baja (35°C), media (45°C), alta (55°C) o muy alta (65°C).

Una vez definidos estos tres parámetros fundamentales para cada caso de estudio concreto, es posible definir las condiciones de carga parcial necesarias para el cálculo del SCOP de referencia, el SCOPon de referencia y el SCOPnet de referencia. Con estos tres parámetros seleccionados, la norma UNE-EN 14825 direcciona al usuario a las tablas de condiciones de carga parcial, que abarcan, según la combinación de estos tres parámetros principales, desde la tabla 6 de la norma hasta la tabla 35. En estas tablas se definen los factores de carga parcial a partir de las condiciones de carga A, B, C, D, E (TOL), F (Tbivalente) y G (en algunos casos concretos)<sup>1</sup>. Siendo TOL la temperatura límite de funcionamiento (por debajo de la cual la máquina térmica no funciona), y la Tbivalente la temperatura a partir de la cual la máquina térmica cubre el 100% de la demanda (por debajo de ella es necesario el uso de un calefactor de reserva).

---

<sup>1</sup> Condición de carga G necesaria en el caso de que la TOL resulte inferior a -22°C para el clima C.

A modo de ejemplo explicativo se presenta a continuación la Tabla 7.2 correspondiente a las condiciones de clima W, temperatura media e instalación del tipo aire-agua:

**Tabla 7.2. Condiciones de carga parcial para el cálculo del SCOP de referencia, el SCOPon de referencia, el SCOPnet de referencia de unidades aire/agua para aplicaciones a temperatura media para la estación de calefacción de referencia W. Fuente: UNE EN 14825 (2).**

	W		Intercambiador de calor exterior <sup>b</sup>	Intercambiador de calor interior	
	Factor de carga parcial	Factor de carga parcial  %	Aire exterior	Temperaturas de entrada/salida	
			Temperatura de bulbo seco (bulbo húmedo) de entrada  °C	Salida fija  °C	Salida variable  °C
A	No aplicable		− 7(− 8)		
B	(+2 − 16)/(Tdesignh − 16)	100	2(1)	<sup>a</sup> / 45	<sup>a</sup> / 45
C	(+7 − 16)/(Tdesignh − 16)	64	7(6)	<sup>a</sup> / 45	<sup>a</sup> / 39
D	(+12 − 16)/(Tdesignh − 16)	29	12(11)	<sup>a</sup> / 45	<sup>a</sup> / 31
E	(TOL − 16)/(Tdesignh − 16)		TOL	<sup>a</sup> / 45	La salida variable debe calcularse mediante la interpolación o extrapolación desde las temperaturas más próximas a TOL <sup>a</sup>
F	(Tbivalent − 16)/(Tdesignh − 16)		Tbivalent	<sup>a</sup> / 45	La salida variable debe calcularse mediante la interpolación entre las temperaturas superior e inferior más próximas a la temperatura bivalente

En la tabla se observa que los valores de factor de carga parcial son dependientes de la temperatura de diseño, así como de las temperaturas de bulbo seco de entrada. Las condiciones de carga parcial E y F se refieren a las temperaturas límite de funcionamiento y bivalente respectivamente. Cabe señalar que estos valores de temperatura y factor de carga son iguales para las tres zonas climáticas (A, W y C). En el caso de que la salida del intercambiador de calor interior sea variable, la temperatura para estas dos condiciones se ha de calcular mediante interpolaciones, tal como indica la tabla.

Una vez definida la tabla de condiciones de carga parcial (en función de los tres parámetros mencionados) se crea una nueva tabla, que la norma UNE denomina tabla C.1., en la cual se introducen los datos de temperatura exterior, temperatura interior y coeficiente de carga parcial obtenidos en la tabla anterior. Además de estos valores se incluyen los de Carga parcial, Potencia declarada, COPd, Cc, CRu y COPbin(Tj), tal como se observa en la Tabla 7.3.

**Tabla 7.3. Tabla C.1. Datos para el SCOP del ejemplo del Anexo C de la UNE-EN 14825 (2).**

	Intercambiador de calor exterior	Intercambiador de calor interior	Coeficiente de carga parcial (%)	Carga parcial (kW)	Potencia declarada (kW)	COP a la potencia declarada COPd	Cc	CRu <sup>a</sup>	COP a carga parcial (fórmula (12)) COPbin(Tj)
	Aire exterior °C	Temperatura del agua de salida para salida variable °C							
<b>A</b>	- 7	34	88%	10,14	9,55	3,26	0,9	1 <sup>b</sup>	3,26
<b>B</b>	2	29	54%	6,17	11,17	4,00	0,9	0,55	3,70
<b>C</b>	7	27	35%	3,97	12,66	4,91	0,9	0,31	4,03
<b>D</b>	12	24	15%	1,76	14,3	5,5	0,9	0,12	3,21
<b>TOL</b>	- 10	37	100%	11,46	7,8	2,6	0,9	1 <sup>b</sup>	2,6
<b>TBivalent</b>	- 6	33	85%	9,7	9,7	3,3	0,9	1	3,3
<sup>a</sup> CRu = carga parcial dividida por la potencia declarada.									
<sup>b</sup> Cuando la potencia declarada es inferior a la carga parcial, el valor de CR se considera igual a 1 y entonces COPbin(Tj) igual a COPd.									

El valor de carga parcial resulta del producto del coeficiente de carga parcial por la potencia a temperatura de diseño. La potencia declarada y el COP a la potencia declarada son datos facilitados por el fabricante, bien de forma directa o bien de forma indirecta (mediante tablas, de manera que sea necesario realizar cálculos intermedios para la obtención de los valores de potencia y COP para las estaciones de referencia estudiadas).

Cc representa el coeficiente de degradación, que la norma UNE define como la medida de la pérdida de eficiencia debida al ciclo para las unidades aire/agua o agua-salmuera/agua (para el caso de unidades aire/aire o agua-salmuera/aire dicho factor se denominará Cd). Este dato será facilitado por el fabricante o, en caso contrario, se tomará de forma arbitraria el valor de 0,9 (0,25 en el caso de Cd).

El parámetro CRu representa el factor de potencia, esto es, el cociente entre la carga parcial o carga completa de calefacción entre la potencia declarada de calefacción de la unidad a igualdad de condiciones de temperatura. Este valor resulta de gran importancia para el cálculo del COP a carga parcial o COPbin(Tj).

El coeficiente de rendimiento específico del periodo o COPbin(Tj), se define para cada periodo j con temperatura exterior Tj en una estación. De forma general, en las condiciones de carga parcial A, B, C, y D pueden darse dos situaciones:

- Que la potencia declarada de la unidad coincida con las demandas de calor requeridas o sea inferior a ellas. En este caso, se toma el valor de COPd correspondiente a la unidad.
- Que la potencia declarada resulte superior a la demanda de calefacción requerida. En este caso debe recurrirse a un método de cálculo del COPbin(Tj), que variará

según el tipo de unidad y el control de potencia de la misma.

Para unidades aire/aire, agua/aire o salmuera/aire de potencia fija el  $COP_{bin}(T_j)$  se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$COP_{bin}(T_j) = COP_d \times (1 - C_d \times (1 - C_{Ru})) \quad (\text{Ec. 9})$$

En este caso si se desconoce el valor de  $C_d$  se ha de tomar un valor por defecto de 0,25.

Para el caso de dichas unidades con potencia variable, la norma indica que se ha de determinar el valor de potencia declarada y  $COP_{bin}(T_j)$  en la etapa más próxima a la unidad a la carga de calefacción requerida. En el caso de que esta no etapa permita obtener el valor de carga de calefacción en una aproximación del 10% (por encima y por debajo), se determinarán los valores de potencia declarada y  $COP_{bin}(T_j)$  para las cargas parciales a ambos lados de la carga de calefacción objeto de estudio. Finalmente, se obtendrá el valor de potencia y COP mediante una simple interpolación lineal entre ambos resultados.

Cuando las unidades son del tipo aire/agua, agua/agua o salmuera/agua y la potencia es fija el  $COP_{bin}(T_j)$  se obtiene de la ecuación:

$$COP_{bin}(T_j) = \frac{C_{Ru}}{C_c \cdot C_{Ru} + (1 - C_c)} \quad (\text{Ec. 10})$$

En este caso si se desconoce el valor de  $C_d$  se ha de tomar un valor por defecto de 0,25.

Si la potencia de dichas unidades es variable se procede de forma análoga al caso anterior.

Una vez obtenida la totalidad de los valores de esta segunda tabla C.1 se ha de crear otra, con el nombre de “Cálculo del periodo del SCOPon” o “Cálculo del periodo del SCOPnet” según el parámetro que se desee determinar, en la cual se cargarán los valores de número de periodo, con su correspondiente temperatura exterior de bulbo seco (valores a partir de la TOL), y número de horas por periodo correspondientes a la estación de referencia estudiada para cada caso concreto (de acuerdo con el ANEXO A de la norma UNE-EN 14825).

Asimismo, se obtiene para cada temperatura la carga de calefacción correspondiente:

- Si la temperatura es una de las temperaturas A, B, C, D, E, F o G se introduce el valor obtenido en la tabla C.1.

- Si la temperatura es otra, se calcula de la forma:

$$\frac{(T_j - 16)}{(T_{designh} - 16)} \times P a T_{designh} \quad (Ec. 11)$$

La siguiente columna será la de la carga de calefacción cubierta por la bomba de calor. Este valor se obtiene de la siguiente manera:

- Para las estaciones de calefacción A, B, C, D, E (TOL), F (Tbiv) y G (en algunos casos), será el valor de potencia declarada en el caso de que este sea inferior o igual al valor de carga de calefacción. En el caso de que sea superior, se tomará el valor de la carga de calefacción.
- Para el caso de las demás temperaturas, el valor de la carga de calefacción aportada por la bomba de calor resultará de la interpolación entre las temperaturas superior e inferior correspondientes a las estaciones A, B, C, D, E (TOL) y F (Tbiv). Esto es, si la potencia buscada se corresponde con una temperatura que se encuentra en el intervalo entre A y B, la potencia resultante será la interpolación entre ambas. Si por el contrario, la temperatura bivalente se encuentra en el intervalo entre A y B y resulta superior a Tj, la interpolación se calculará con los valores de A y Tbivalente. Si la temperatura es superior a la estación de calefacción D se ha de realizar una extrapolación entre las dos temperaturas inferiores a ella más próximas.

El siguiente parámetro a determinar es el de potencia del calefactor eléctrico de reserva (elbu(Tj)), que resulta de la resta entre la carga de calefacción y la carga de calefacción cubierta por la bomba de calor. Este valor pone de manifiesto el hecho de que la bomba de calor puede en algún caso no ser suficiente para cubrir la demanda, haciéndose necesario el uso de un sistema adicional de aporte de calor.

Adicionalmente a estos parámetros se incluyen otros que variarán en función de si el objetivo de cálculo es el SCOPon de referencia o el SCOPnet de referencia. A continuación se detalla separadamente el proceso de obtención de estos dos resultados.

#### 7.1.1. Cálculo del SCOPon de referencia

Previamente en este documento, en el apartado de conceptos teóricos, se ha definido el parámetro SCOPon, así como su fórmula matemática (Ec. 4). Es esta ecuación la que determina los parámetros y valores de las distintas columnas que constituyen la tabla de cálculo del SCOPon.

El siguiente término a determinar es el de la resistencia al calor anual, que resulta del producto de las horas de trabajo por la potencia del calefactor eléctrico de reserva.



A continuación, se obtiene el  $COP_{bin}(T_j)$ , que previamente se ha definido para las estaciones de calefacción A, B, C, D, G (según el caso), E(TOL) y F(Tbiv). Para las temperaturas  $T_j$  no correspondientes a una estación de calefacción, el cálculo del  $COP_{bin}(T_j)$  es análogo al de la carga de calefacción cubierta por la bomba de calor, resultando de la interpolación entre las temperaturas superior e inferior que resulten para cada caso.

Seguidamente se obtiene la demanda de calefacción anual, resultante del producto de las horas de trabajo por la carga de calefacción. Finalmente, se calcula la aportación de energía anual incluyendo el calefactor eléctrico de reserva como:

$$\begin{aligned} \text{aportación de energía anual con calor resistivo} = \\ = h_j \times \left[ \frac{(Ph(T_j) - elbu(T_j))}{COP_{bin}(T_j)} + elbu(T_j) \right] \end{aligned} \quad (\text{Ec. 12})$$

Estos cálculos se observan en la siguiente Tabla 7.4 para el caso del ejemplo resuelto en la norma UNE.

**Tabla 7.4. Extracto de la tabla C.2 Cálculo del PERIODO para el SCOPon del Anexo C de la norma UNE-EN 14825 (2).**

	Periodo	Temperatura exterior (bulbo seco)	Horas	Carga de calefacción	Carga de calefacción cubierta por la bomba de calor	Calefactor eléctrico de reserva	Resistencia al calor anual	$COP_{bin}(T_j)$	Demanda de calefacción anual	Aportación de energía anual incluyendo calefactor eléctrico de reserva <sup>a</sup>
	j	$T_j$	$h_j$	$Ph(T_j)$		$elbu(T_j)$	$H_j \times elbu(T_j)$		$h_j \times Ph(T_j)$	
	–	°C	h	kW	kW	kW	kWh		kWh	kWh
F	21	– 10	1	11,46	7,80	3,66	4	2,60	11	7
	22	– 9	25	11,02	8,38	2,64	66	2,82	276	140
	23	– 8	23	10,58	8,97	1,62	37	3,04	243	105
A	24	– 7	24	10,14	9,55	0,59	14,18	3,26	243	84
E	25	– 6	27	9,70	9,70	0,00	0,00	3,30	262	79
	26	– 5	68	9,26	9,26	0,00	0,00	3,35	630	188
	27	– 4	91	8,82	8,82	0,00	0,00	3,40	802	236
	28	– 3	89	8,38	8,38	0,00	0,00	3,45	746	216
	29	– 2	165	7,94	7,94	0,00	0,00	3,50	1 310	374
	30	– 1	173	7,50	7,49	0,00	0,00	3,55	1 297	365
	31	0	240	7,05	7,05	0,00	0,00	3,60	1 693	470
	32	1	280	6,61	6,61	0,00	0,00	3,65	1 852	507
B	33	2	320	6,17	6,17	0,00	0,00	3,70	1 975	534
	34	3	357	5,73	5,73	0,00	0,00	3,77	2 046	543
	35	4	356	5,29	5,29	0,00	0,00	3,83	1 884	492
	36	5	303	4,85	4,85	0,00	0,00	3,90	1 470	377

El valor del SCOPon resulta del cociente entre la suma para todas las temperaturas de la

demanda de calefacción anual entre la aportación de energía anual incluyendo el calefactor eléctrico de reserva.

### 7.1.2. Cálculo del SCOPnet de referencia

Para el caso del SCOPnet, definido previamente en el capítulo de conceptos básicos, donde se muestra la expresión de cálculo de este parámetro (Ec. 3). Esta expresión constituye la base del cálculo del proceso que se explicará a continuación.

Se obtiene el valor de COPbin(Tj) mediante un procedimiento análogo al caso del SCOPon. Adicionalmente se obtiene el valor de demanda de calefacción anual neta como el producto de las horas de funcionamiento y la resta de la demanda de calefacción y la carga de calefacción cubierta por el calefactor eléctrico de reserva. Finalmente, se obtiene la aportación de energía anual neta de acuerdo con la expresión:

$$\text{aportación de energía neta anual con calor resistivo} = h_j \times \left[ \frac{(Ph(T_j) - elbu(T_j))}{COP_{bin}(T_j)} \right] \quad (\text{Ec. 13})$$

De igual forma que en el caso del SCOPon se muestra la Tabla 7.5 como un ejemplo explicativo del proceso de cálculo del SCOPnet.

**Tabla 7.5. Extracto de la tabla C.3 Cálculo del PERIODO para el SCOPnet del Anexo C de la norma UNE-EN 14825 (2).**

	Periodo	Temperatura exterior (bulbo seco)	Horas	Demanda de calefacción	Carga de calefacción cubierta por la bomba de calor	Calor resistivo	COPbin(Tj)	Potencia de calefacción anual neta	Aportación de energía anual neta <sup>a</sup>
	j	Tj	h <sub>j</sub>	Ph(Tj)		elbu(Tj)		$h_j \times (Ph(T_j) - elbu(T_j))$	
	–	°C	h	kW	kW	kW		kWh	kWh
F	21	– 10	1	11,46	7,80	3,66	2,60	8	3
	22	– 9	25	11,02	8,38	2,64	2,82	210	74
	23	– 8	23	10,58	8,97	1,62	3,04	206	68
A	24	– 7	24	10,14	9,55	0,59	3,26	229	70
E	25	– 6	27	9,70	9,70	0,00	3,30	262	79
	26	– 5	68	9,26	9,26	0,00	3,35	630	188
	27	– 4	91	8,82	8,82	0,00	3,40	802	236
	28	– 3	89	8,38	8,38	0,00	3,45	746	216
	29	– 2	165	7,94	7,94	0,00	3,50	1 310	374
	30	– 1	173	7,50	7,49	0,00	3,55	1 297	365
	31	0	240	7,05	7,05	0,00	3,60	1 693	470
	32	1	280	6,61	6,61	0,00	3,65	1 852	507

De esta manera, el SCOPnet se obtiene como el cociente de la suma, para todas las temperaturas, de la potencia de calefacción anual neta entre el aporte de energía actual neta.

Una vez estudiado el procedimiento de cálculo del SCOPon y SCOPnet de la norma, el siguiente paso a seguir es el de creación de la herramienta de Excel que permita la obtención de dichos valores para cualquier bomba de calor del mercado. Esta herramienta ha de realizar los cálculos mencionados, de acuerdo con la normativa, de manera automatizada, y contemplando las diversas posibilidades en lo referente a tecnologías de bomba de calor.

## 7.2. Cálculo en modo refrigeración

En el caso de que la bomba de calor funcione en modo de refrigeración, esto es, aportando frío al recinto a acondicionar, el rendimiento a calcular será el SEERon y el SEER, definidos previamente en los apartados 5.2.4 y 5.2.5 de este trabajo. La UNE 14825 explica el procedimiento de cálculo de dichos parámetros, adjuntando en su Anexo B un ejemplo de cálculo de los mismos.

El modo de proceder para el cálculo en este caso presenta ciertas similitudes al caso del SCOP, si bien el proceso se simplifica significativamente.

De esta manera, el primer parámetro a definir es el de temperatura de diseño de referencia en modo refrigeración ( $T_{designc}$ ), expresado en grados centígrados. La norma especifica este valor para unas condiciones de temperatura exterior de bulbo seco de 35°C y 27°C de temperatura interior de bulbo seco.

Seguidamente, se han de calcular las condiciones de carga parcial A, B, C y D, que se obtienen a partir de los factores de carga parcial, haciendo uso del valor de la temperatura de diseño y de las temperaturas de 35°C para la condición A, 30°C para el caso de la condición B, 25°C para C y 20°C para la condición de carga D. Estos factores de carga serán iguales independientemente del tipo de unidad que presente la bomba de calor de estudio. En la Tabla 7.6 se muestran los valores de factor de carga definidos, así como las temperaturas de bulbo seco de aire exterior para cada condición de carga parcial.

**Tabla 7.6. Factores de carga parcial y temperatura de bulbo seco del aire exterior para el caso de modo refrigeración. Fuente: UNE 14825 (2).**

	Factor de carga parcial (absoluto)	Factor de carga parcial (%)	Temperatura de bulbo seco del aire exterior (°C)
A	$(35-16)/(T_{designc}-16)$	100	35
B	$(30-16)/(T_{designc}-16)$	74	30
C	$(25-16)/(T_{designc}-16)$	47	25
D	$(20-16)/(T_{designc}-16)$	21	20

### 7.2.1. Cálculo del SEERon de referencia

En el apartado 5.2.4 se ha definido el SEERon, presentando la ecuación de cálculo del mismo. A continuación se detallará el proceso de obtención de los parámetros necesarios en dicha ecuación.

La UNE 14825 presenta, mediante el uso de diversas tablas, las condiciones de carga parcial para distintas tipologías de bomba de calor. De esta manera, las tablas 2 a 5 de la norma presentan las mencionadas condiciones de carga para unidades del tipo aire/aire, agua/aire y salmuera/aire, aire/agua y finalmente unidades agua/agua o salmuera/agua.

Con el objeto de calcular el SEERon y el SEER, habiendo definido la temperatura de diseño y las condiciones de carga parcial, el fabricante ha de definir el valor de carga completa o  $P_{designc}$ , así como los valores de potencia declarada ( $P_{dc}$ ) y EER a dicha potencia ( $EER_d$ ). Con el dato de la potencia de diseño y los factores de carga parcial, se obtienen los valores de carga parcial (multiplicando el factor de carga para cada caso por la carga completa). Con estos valores la norma UNE propone la creación de la tabla B.1, la cual se muestra a continuación (Tabla 7.7), a modo de ejemplo explicativo, que ha sido extraído del anexo B de la norma:

**Tabla 7.7. Tabla B.1 "Datos para el SEER". Fuente: norma UNE 14825 (2).**

	Aire exterior  °C	Coefficiente de carga parcial  %	Carga parcial  kW	Potencia declarada ( $P_{dc}$ )  kW	EER a la potencia declarada ( $EER_d$ )	$C_d$	$CRu^a$	EER a carga parcial ( $EER_{bin}(T_j)$ ) (Fórmula 6)
A	35	100	3,5	3,5	3	0,25	1	3
B	30	74	2,58	2,58	3,5	0,25	1	3,5
C	25	47	1,66	1,95	4	0,25	0,85	3,85
D	20	21	0,74	2,03	4,5	0,25	0,36	3,78

<sup>a</sup>  $CRu$  = Carga parcial dividida por la potencia declarada.

En la Tabla 7.7, adicionalmente a los valores de factor de carga, carga parcial, potencia declarada y EER, se muestran los valores del coeficiente de degradación ( $C_d$ ), el factor de potencia ( $CR_u$ ) y el EER a la carga parcial ( $EER_{bin}(T_j)$ ). El coeficiente de degradación, que representa la pérdida de eficiencia del ciclo ha sido explicado anteriormente en este mismo apartado de metodología de cálculo para el caso del SCOP. El valor del mismo puede ser igual para modo calefacción y modo refrigeración o puede ser distinto. En este segundo caso, se diferencia un valor de otro denominando  $C_{dc}$  al coeficiente de degradación para refrigeración y  $C_{dh}$  para calefacción. El factor de potencia, al igual que para el caso del SCOP, se define como el cociente entre la carga parcial y la potencia declarada, en caso de que este valor sea inferior a la unidad. En caso contrario, se toma el valor de la unidad.

El último parámetro presente en la Tabla 7.7 es el EER a carga parcial o  $EER_{bin}(T_j)$ . Para el caso de la condición de carga parcial A, esto es, la situación de carga completa, la carga y la potencia declarada presentan el mismo valor. Por tanto, el  $EER_{bin}(T_j)$  será el valor de EER declarado por el fabricante. Para el caso de las condiciones de carga parcial B, C y D la situación es diferente. La norma UNE señala dos posibilidades, que la potencia declarada de la unidad coincida con las cargas de refrigeración requeridas o que la potencia declarada sea superior a dichas cargas. En el primer caso se ha de utilizar un valor de  $EER_{bin}(T_j)$  idéntico al declarado, mientras que en el segundo caso, en el cual la unidad ha de efectuar un ciclo de encendido-apagado, ha de hacerse servir el valor del factor de degradación y del factor de potencia para obtener el  $EER_{bin}(T_j)$ .

En la normativa se presentan diferentes métodos de cálculo del  $EER_{bin}(T_j)$ , diferenciando entre la tipología de bomba de calor empleada y el modo de funcionamiento de la misma (a capacidad fija o variable). A continuación se muestran las distintas posibilidades de forma breve, pues son análogas al caso del  $COP_{bin}(T_j)$  y por tanto ya se han explicado.

Primeramente para el caso de unidades aire/aire y agua/aire de capacidad fija, el EER para las condiciones B, C y D, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$EER_{bin}(T_j) = EER_d \times (1 - C_d \times (1 - CR_u)) \quad (Ec. 14)$$

Donde el factor de degradación y de potencia ya han sido definidos.

En el caso de que las unidades sean aire/agua, agua/agua o salmuera/agua y del tipo potencia fija, la ecuación será de la forma:

$$EER_{bin}(T_j) = \frac{CR_u}{C_c \cdot CR_u + (1 - C_c)} \quad (Ec. 15)$$

Nótese que para este segundo caso el coeficiente de degradación es  $C_c$ , con un valor predeterminado (en caso de que no lo proporcione el fabricante), de 0,9, mientras que en el

caso anterior recibía la denominación Cd, al que le corresponde un valor por defecto de 0,25.

Una vez definida esta Tabla 7.7 se ha de proceder a cargar los valores de periodo, temperatura exterior y horas extraídas de la tabla A.1 del Anexo A de la norma. Para el caso del modo refrigeración trabajaremos siempre con los mismos valores de periodo y horas, mientras que en el caso del SCOP, como se ha comentado previamente, existía una cierta variación según el clima “A”, “W” o “C” con el cual se estuviese trabajando. Este hecho simplifica el proceso para el caso del modo de refrigeración.

Con estos datos se genera la tabla B.2 de la norma, un extracto de la cual se muestra a continuación en la Tabla 7.8:

**Tabla 7.8. Extracto de la tabla B.2. "Cálculo del periodo para el SEERon". Fuente: UNE 14825.**

Periodo	Temperatura exterior	Horas	Carga de refrigeración	EERPL	Demanda de anual de refrigeración	Aportación de energía anual
j	Tj °C	h <sub>j</sub> h	Pc(Tj) kW		h <sub>j</sub> × Pc(Tj) kWh	h <sub>j</sub> × (Pc(Tj) / EER(Tj)) kWh
1	17	205	0,18	3,78	38	10
2	18	227	0,37	3,78	84	22
3	19	225	0,55	3,78	124	33
<b>D</b>	<b>4</b>	<b>20</b>	<b>0,74</b>	<b>3,78</b>	<b>166</b>	<b>44</b>
	5	21	0,92	3,79	199	52
	6	22	1,11	3,81	238	62
	7	23	1,29	3,82	281	74
	8	24	1,47	3,84	290	76
<b>C</b>	<b>9</b>	<b>25</b>	<b>1,66</b>	<b>3,85</b>	<b>295</b>	<b>77</b>
	10	26	1,84	3,78	291	77
	11	27	2,03	3,71	278	75
	12	28	2,21	3,64	241	66
	13	29	2,39	3,57	211	59
<b>B</b>	<b>14</b>	<b>30</b>	<b>2,58</b>	<b>3,5</b>	<b>162</b>	<b>46</b>
	15	31	2,76	3,40	108	32

Para cada periodo se obtienen los valores de carga de calefacción o Pc(Tj), haciendo uso de los factores de carga parcial definidos en la Tabla 7.7 pero para cada valor de temperatura. Seguidamente se obtienen los valores de EERPL, que para el caso de las condiciones de carga parcial A, B, C, D son los resultados de EERbin(Tj), mientras que para los demás se han de calcular como una interpolación entre las temperaturas de las condiciones A, B, C y D según el intervalo en el que se encuentren. Esto es, por ejemplo, para una temperatura de 22°C que se encuentra entre las condiciones C y D el valor del EERPL resultará de la interpolación con ambas condiciones. Para el caso de temperaturas inferiores a la temperatura D (20°C), se tomará el valor de EER de esta. Mientras que para el caso de temperaturas superiores a A (35°C), el EER será el correspondiente a dicha condición de carga.

Una vez obtenidos los valores de carga de refrigeración y EER para cada periodo se obtienen la demanda anual de refrigeración (el producto de la carga de refrigeración por las horas correspondientes a cada periodo) y la aportación de energía anual (el cociente entre la demanda anual de refrigeración y el EER). Finalmente se calcula el SEERon mediante el cociente de la suma de demanda anual de refrigeración de todos los periodos dividido entre la suma la aportación de energía anual para todos los periodos.

### 7.2.2. Cálculo del SEER de referencia

En el apartado de conceptos teóricos de este Trabajo Fin de Máster se ha definido el concepto de SEER de referencia, así como la expresión de cálculo del mismo (punto 5.2.5). De esta manera, una vez obtenido el valor del SEERon, y en caso de disponer de los valores de potencia en modo desactivado ( $P_{off}$ ), potencia de modo en espera ( $P_{SB}$ ), potencia con termostato apagado ( $P_{TO}$ ), potencia de dispositivo de calentamiento de cárter ( $P_{CK}$ ), es posible calcular el valor de SEER de referencia.

El cálculo se realiza de acuerdo a la ecuación (Ec. 8), tomando los datos del número de horas para cada modo de la tabla E.1 y E.3 de la norma UNE 14825. Se ha de prestar especial atención al modo de uso de la bomba de calor estudiada, esto es, sólo para refrigeración o reversible (en caso que permita ser empleada también en modo calefacción), ya que los valores de horas presentados por la norma serán diferentes según el caso.

De igual forma que para el caso del cálculo del SCOPon y SCOPnet, la herramienta de Excel creada ha de permitir el cálculo del SEER y SEERon para las distintas bombas de calor con posibilidad de trabajo en modo refrigeración del mercado. El proceso de cálculo ha de ser automático y contemplar diferentes tipologías de bombas de calor del mercado.

## 8. Herramienta de cálculo

El objetivo principal de este proyecto es el de desarrollo de una herramienta de Excel que permita obtener el SCOP y SEER aplicable sobre distintos equipos y fabricantes del sector. En este programa de Excel se ha de seguir el procedimiento de cálculo definido por la norma europea UNE-EN 14825:2014 y comentado en el apartado anterior del texto.

Una de las mayores dificultades que implica la creación de esta herramienta es el hecho de que ha de tratarse de una herramienta global, esto es, que debe obtener el resultado del rendimiento de forma exacta para cualquier tipo de máquina, perteneciente a diferentes marcas comercializadas en el mercado. Pareja a esta dificultad se presenta el requerimiento de que la herramienta debe de resultar de utilización sencilla para el usuario, de forma que este se limite a introducir los datos proporcionados por el fabricante en cuestión, sin necesidad de realizar cálculos o acondicionar los datos para el Excel, y que el propio programa se encargue de realizar todas las operaciones pertinentes. Estas dos necesidades implican un elevado grado de complicación a la hora de configurar el programa.

De esta manera, se ha considerado que el procedimiento de creación de la herramienta de Excel más adecuado consiste en comenzar creando un Excel que solucione el ejemplo de la norma (tanto para el caso del SCOP como del SEER), de los cuales se conocen todos los datos y resultados, y posteriormente modificarlos de tal forma que este mismo archivo permita el cálculo de cualquier otra tipología de bomba de calor disponible en el mercado.

### 8.1. Obtención del SCOPon, SCOPnet y SCOP de referencia

En apartados anteriores se han comentado los tres parámetros principales, de acuerdo con la norma UNE, para la definición de las características de las bombas de calor, esto es, el clima, la temperatura y el tipo de unidad. En función de estos tres factores las condiciones de carga parcial de la máquina térmica serán unas u otras, tal como se muestra en las tablas 6 a 35 de la susodicha norma.

Por lo tanto, el primer paso en la creación del programa es la introducción de dichas tablas, con sus correspondientes localizadores (clima, temperatura, tipo de unidad), dentro del Excel. Para ello se crea una hoja de cálculo de Excel con la denominación “Tablas Norma 6-35”. Cabe señalar que estas tablas presentan valores para las condiciones de carga parcial A, B, C, D, E (TOL), F (Tbiv) y G<sup>2</sup> (en algunos casos). Las condiciones E y F serán dependientes de los datos introducidos, según el fabricante. De esta manera en esta hoja se

---

<sup>2</sup> Se define la condición de carga parcial G en caso de que la TOL sea inferior a -22°C y para el clima C.



introducen todas las tablas de la norma correspondientes al apartado de la misma “Condiciones de carga parcial en modo calefacción” (tabla 6 a 35), tal como se observa, a modo de ejemplo, en la Tabla 8.1:

**Tabla 8.1. Ejemplo de tabla introducida en Excel. Condiciones clima A, temperatura baja y unidad aire/agua.**

	A		INTERCAMBIADOR DE CALOR EXTERIOR		INTERCAMBIADOR DE CALOR INTERIOR	
	Factor de carga parcial	Factor de carga parcial %	AIRE EXTERIOR		TEMPERATURAS DE ENTRADA/SALIDA	
			Temperatura de bulbo seco del aire exterior °C	Temperatura de bulbo seco del aire interior °C	Salida fija °C	Salida variable °C
<b>A</b>	0.88461538	88%	-7	-8	35	34
<b>B</b>	0.53846154	54%	2	1	35	30
<b>C</b>	0.34615385	35%	7	6	35	27
<b>D</b>	0.15384615	15%	12	11	35	24
<b>E (TOL)</b>	1		-10	-10	35	35.33
<b>F (Tbiv)</b>	0.847162749		-6	-6	35	33.57

Posteriormente, se crea la hoja “ANEXO\_C”, en la cual se realizarán los cálculos de SCOPon y SCOPnet, siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo C de la norma UNE-EN 14825 (y explicado en los apartados anteriores 7.1.1 y 7.1.2).

Primeramente, en la hoja “ANEXO\_C” se crea una tabla con los tres localizadores mencionados: clima, temperatura y unidades. Una vez el usuario seleccione dichos parámetros, el Excel automáticamente reconocerá la tabla de la hoja “Tablas\_Norma\_6-35” a la que debe hacer referencia. Para ello se hace servir una condición de Excel SI, conjuntamente con la condición Y, de manera que el programa generará la tabla que presente la combinación exacta de los tres parámetros señalados en la búsqueda.

Conjuntamente con estos tres factores el Excel solicita al usuario la introducción de los valores de temperaturas Tdesignh (temperatura de diseño de referencia para calefacción, definida en función del clima), Tbivalente y TOL (temperatura límite de funcionamiento). Adicionalmente, se han de introducir los valores de potencia declarada y COP a cada una de las temperaturas mencionadas.

Una vez hecho esto, el programa genera la tabla C.1 de la norma, “Datos para el SCOP”. En dicha tabla figuran los factores de carga parcial para cada estación de referencia, juntamente con las temperaturas de bulbo seco del aire exterior e interior, los valores de carga parcial, potencia declarada, COPd, Cc, CRUa y COPbin(Tj). Los valores de temperatura son extraídos directamente de la tabla correspondiente de la hoja “Tablas\_Norma\_6-35”. El valor de carga parcial se calcula multiplicando el factor de carga parcial por la potencia a temperatura de diseño. La potencia declarada, el COP a la potencia declarada COPd y el factor de degradación Cc son datos del fabricante que el usuario ha de introducir. A continuación se presenta un ejemplo de esta tabla C.1 en el Excel, con los

datos de cálculo del ejemplo que presenta la norma en su Anexo C (Tabla 8.2):

**Tabla 8.2. Ejemplo de fragmento de tabla C.1.de Excel.**

TABLA C.1 Datos para el SCOP	A		INTERCAMBIADOR DE CALOR EXTERIOR	INTERCAMBIADOR DE CALOR INTERIOR	Carga parcial kW	Potencia declarada	COP a la potencia declarada COPd	Cc (factor de degradación)
	Factor de carga parcial	Factor de carga parcial %	Temperatura de bulbo seco del aire exterior °C	Temperatura de bulbo seco aire interior °C				
A	0.884615385	88%	-7	34	10.14	9.55	3.26	0.9
B	0.538461538	54%	2	30	6.17	11.17	4	0.9
C	0.346153846	35%	7	27	3.97	12.66	4.91	0.9
D	0.153846154	15%	12	24	1.76	14.3	5.5	0.9
E (TOL)	1	100%	-10	35.33333333	11.46	7.8	2.6	0.9
F (Tbivalent)	0.847162749	85%	-6.02623148	33.56721399	9.71	9.7	3.3	0.9
G	---	---	-15	---	---	---	---	0.9

En la norma UNE, para algunos casos concretos, cuando TOL es inferior o igual a -22°C, se ha de utilizar también la estación de referencia G. Por esta razón en la tabla C.1 se incluye dicho parámetro, el cual presentará unos valores de “---” en el caso de que no sea necesaria dicha estación.

El factor de potencia o CRUa, tal como se ha explicado previamente, toma el valor de la unidad en el caso de que la potencia declarada sea superior a la carga parcial, y el cociente de la carga parcial entre la potencia declarada en caso contrario.

El COP a carga parcial o COPbin(Tj) se calcula de acuerdo a lo comentado en el apartado 7.1.

Seguidamente se genera la tabla conjunta C.2 y C.3, “Cálculo del periodo para el SCOPon” y “Cálculo del periodo para el SCOPnet”. Esta tabla puede subdividirse, a efectos de la explicación, en dos partes, una primera de datos obtenidos y la segunda de cálculos.

La primera parte, formada por las tres primeras columnas, se corresponde con los datos de periodo, temperatura exterior Tj y horas hj. Los dos primeros valores son constantes y abarcan desde la temperatura -30 a la 15°C (aunque no todos los valores de temperatura serán necesarios para el cálculo, ya que este se realiza a partir de la TOL). En cuanto a las horas son cargadas de la hoja de Excel “ANEXO\_A”, que diferencia entre el clima medio “A”, más cálido “W” o más frío “C”.

Es la segunda parte de la tabla la que genera mayores complicaciones a la hora de su configuración. Es en ella donde se ponen de manifiesto las dos principales dificultades en la elaboración del programa, la necesidad de que se trate de una herramienta global y al mismo tiempo sencilla y de fácil entendimiento para el usuario. El problema se encuentra en el cálculo de la carga de calefacción cubierta por la bomba de calor y del COP a carga parcial COPbin(Tj). Estos valores vienen dados para las estaciones de calefacción en la tabla anterior C.1. Para el caso de las demás temperaturas, tal como se ha explicado

previamente en el apartado 7.1 y de acuerdo con la norma, debe realizarse una interpolación entre los valores de temperatura superior e inferior a la temperatura estudiada.

La complicación surge del hecho de que, al tratarse de una herramienta global, que puede presentar diferentes valores de temperatura bivalente y temperatura límite de operación, a priori no se puede afirmar donde se encuentran estas temperaturas localizadas dentro de la lista de temperaturas, y por tanto dependiendo del valor que tomen, las interpolaciones se realizarán en unos intervalos u otros. A modo de ejemplo para una mayor comprensión, puede darse el caso de que la temperatura bivalente se encuentre entre las estaciones TOL y A, de manera que los valores de temperatura que se encuentren entre TOL y  $T_{biv}$  se interpolarán entre estas temperaturas; o que por el contrario se encuentre la temperatura bivalente entre A y B, de forma que para las temperaturas dentro de este intervalo la interpolación resultará diferente a la del otro ejemplo.

Para resolver este problema se ha pensado en varias opciones, las cuales se comentan a continuación.

- **Primera propuesta para el cálculo de las interpolaciones:**

Programación de una condición SI en el Excel que contemple todas las posibilidades e intervalos y calcule el valor de potencia o COP para cada caso. Para ello se ha de conocer cuáles son todos los posibles intervalos entre los cuales se puede encontrar la temperatura.

Primeramente, puede ocurrir que la temperatura objeto de estudio se corresponda con una de las estaciones de calefacción (A, B, C, D, E, F o G), en este caso, directamente el Excel escribirá el valor de la potencia o COP que figura en la tabla C.1, tal como se muestra en la Tabla 8.3:

**Tabla 8.3. Tabla resumen de las condiciones SI para la obtención de la potencia declarada y el  $COP_{bin}(T_j)$  en caso de que  $T_j$  sea igual a alguna de las temperaturas de las estaciones de calefacción.**

Condición SI	Valor de potencia declarada	Valor de $COP_{bin}(T_j)$
$T_j = T_{OL}$	$Pd_{TOL}$	$COP_{bin_{TOL}}$
$T_j = T_{biv}$	$Pd_{Tbiv}$	$COP_{bin_{Tbiv}}$
$T_j = T_G$	$Pd_G$	$COP_{bin_G}$
$T_j = T_A$	$Pd_A$	$COP_{bin_A}$
$T_j = T_B$	$Pd_B$	$COP_{bin_B}$
$T_j = T_C$	$Pd_C$	$COP_{bin_C}$

$T_j = T_D$	$Pd_D$	$COP_{bin_D}$
-------------	--------	---------------

Puede suceder que la temperatura se encuentre por debajo de TOL, en este caso, dicha temperatura no se incluirá en el cálculo, ya que, de acuerdo con la norma, la potencia de la bomba de calor a temperaturas del aire exterior inferiores a TOL es de 0 kW, y el Excel devolverá el valor “---” (Tabla 8.4):

**Tabla 8.4. Condición SI para el caso de que  $T_j$  se encuentre por debajo de TOL.**

Condición SI	Valor de potencia declarada	Valor de $COP_{bin}(T_j)$
$T_j < TOL$	" --- "	" --- "

Se han de contemplar los intervalos entre A y B, B y C, C y D (G y A según el caso). Si la temperatura buscada se encuentra en uno de estos intervalos y entre ellos no se encuentra la temperatura bivalente se realizará la interpolación entre la temperatura de estudio y las estaciones de calefacción superior e inferior que correspondan (Tabla 8.5):

**Tabla 8.5. Interpolaciones entre los intervalos G-A, A-B, C-C, C-D para la obtención de la potencia declarada.**

Condición SI	Valor de potencia declarada
$T_G < T_j < T_A$	$Pd_G + \frac{(T_j - T_G)}{(T_A - T_G)} \times (Pd_A - Pd_G)$
$T_A < T_j < T_B$	$Pd_A + \frac{(T_j - T_A)}{(T_B - T_A)} \times (Pd_B - Pd_A)$
$T_B < T_j < T_C$	$Pd_B + \frac{(T_j - T_B)}{(T_C - T_B)} \times (Pd_C - Pd_B)$
$T_C < T_j < T_D$	$Pd_C + \frac{(T_j - T_C)}{(T_D - T_C)} \times (Pd_D - Pd_C)$

Si la temperatura de estudio es superior a D se realizará una extrapolación entre C y D:

**Tabla 8.6. Extrapolación para obtención de la potencia declarada a  $T_j$  mayor que  $T_D$ .**

Condición SI	Valor de potencia declarada
$T_j > T_D$	$Pd_C + \frac{(T_j - T_C)}{(T_D - T_C)} \times (Pd_D - Pd_C)$

Por otra parte se encuentra el caso de TOL y  $T_{bivalente}$  que pueden tomar diversos valores. Primeramente TOL, puede ocurrir que se encuentre por debajo de G, por debajo de A, por debajo de B y encima de A, etcétera. El Excel ha de contemplar todas estas posibilidades y realizar las interpolaciones en función de ello.

Por último, el caso de Tbivalente. Puede suceder que se encuentre entre TOL y A, entre A y B, entre B y C, entre C y D. Asimismo, en el caso de que TOL sea superior a A, la Tbivalente puede encontrarse entre TOL y B (o entre TOL y C, etcétera). En la Tabla 8.7 se muestran varios ejemplos explicativos de la posible situación de la temperatura bivalente, concretamente entre TOL y A y entre A y B, pero existen muchas otras posibilidades.

**Tabla 8.7. Ejemplos de interpolaciones para calcular la potencia en función de donde se encuentre Tbivalente y Tj.**

Condición SI	Valor de potencia declarada
$TOL < T_{biv} < T_j < T_A$	$Pd_{T_{biv}} + \frac{(T_j - T_{biv})}{(T_A - T_{biv})} \times (Pd_A - Pd_{T_{biv}})$
$T_A < T_j < T_{biv} < T_B$	$Pd_A + \frac{(T_j - T_A)}{(T_{biv} - T_A)} \times (Pd_{T_{biv}} - Pd_A)$

El desarrollo de la herramienta de Excel de acuerdo con esta primera opción explicada, si bien resulta muy ilustrativa de la amplitud de posibilidades en cuanto a los intervalos y temperaturas posibles, presenta una serie de inconvenientes. Al inicio del apartado se comentaban las dos grandes dificultades con las que se ha de lidiar en la programación de la hoja de cálculo: la globalidad de la misma conjuntamente con la sencillez de uso. Desarrollando esta primera idea expuesta, el último requisito, el de sencillez, no se cumple, ya que se trata de una condición SI muy extensa que, al contemplar todas las posibilidades, genera un código largo y de difícil comprensión para el usuario. Adicionalmente, la probabilidad de cometer un error en alguna de las muchas operaciones del programa, conjuntamente con la posibilidad de que en algún momento surja una condición no contemplada previamente, disminuye la fiabilidad de la herramienta. Por esta razón se considera que esta resolución no es la adecuada, y se ha de buscar otra más sencilla y con menor probabilidad de error.

La búsqueda de una solución más simple conlleva el estudio de las diferentes fórmulas que proporciona el Excel, con el objetivo de obtener las interpolaciones de forma correcta y sin necesidad de escribir un código tan extenso como en la opción previa.

■ **Segunda propuesta para el cálculo de las interpolaciones:**

Se ha llegado a la conclusión de que el procedimiento más adecuado es, para cada situación (para cada caso concreto de bomba de calor), ordenar la tabla C.1 según sus temperaturas de bulbo seco del aire exterior (de menor a mayor). Una vez hecho esto resulta mucho más sencillo realizar las interpolaciones, ya que tan solo hay que buscar, en esa tabla ordenada, el intervalo en el cual se encuentra la temperatura estudiada en cada caso. El procedimiento seguido se comenta a continuación.

Se da formato de tabla en Excel a la tabla C.1 y se ordenan sus valores de menor a mayor de acuerdo con la temperatura de bulbo seco del aire exterior. Para una mayor simplicidad en posteriores usos se crea una sencilla Macro que se encargue de ejecutar dicha acción de ordenado de la tabla. A continuación, se generan las columnas de temperaturas, periodo y horas correspondientes. Con los datos de temperatura para cada periodo y la tabla C.1 se pueden obtener las temperaturas superior e inferior.

Primeramente, la temperatura inferior se calcula empleando la fórmula BUSCARV, especificando la temperatura del periodo y la tabla C.1, concretamente la columna 1 que es la que se corresponde con las temperaturas. El valor VERDADERO implica la búsqueda de una coincidencia aproximada, ya que nuestro objetivo es el de encontrar una temperatura inferior, no la temperatura exacta en la tabla. Finalmente, se ha de contemplar la posibilidad de que la temperatura estudiada se encuentre por debajo de todos los valores presentes en la tabla C.1. Esto implica que se encuentra por debajo de la temperatura límite de funcionamiento, que siempre es la mínima. En este caso, esta temperatura no ha de ser tomada en cuenta y el Excel devolverá un valor de la forma "---". Para ello, se emplea la fórmula SI.ERROR, que engloba la función BUSCARV y en caso de error devuelve "---". En la Figura 8.1 se muestra dicha ecuación comentada:

```
=SI.ERROR(BUSCARV(Tj;TablaC1[[Temperatura de bulbo seco  
del aire exterior °C]:[Potencia declarada para cálculos '[kW']]];  
1;VERDADERO);"---")
```

**Figura 8.1. Ecuación de Excel para el cálculo de la temperatura inferior.**

Para la temperatura superior la resolución se vuelve más compleja. En este caso, se harán servir las funciones INDICE y COINCIDIR para obtener el valor de temperatura. La función de Excel INDICE devuelve un valor desde una tabla, de acuerdo con una referencia señalada. Así, se introduce la tabla C.1 en dicha fórmula. Como especificador de filas se introduce la fórmula COINCIDIR. Esta fórmula es similar a BUSCARV pero en lugar de buscar un valor busca una posición en la columna (referencia). De esta manera, se busca la temperatura estudiada dentro de la columna de temperaturas. Si la fórmula se dejase de esta manera, se devolvería la posición de la temperatura inferior (igual que en el caso de BUSCARV). Como la tabla C.1 está ordenada por temperaturas de menor a mayor, se suma a la columna de la fórmula de COINCIDIR una unidad, de manera que en vez de devolver la posición de la temperatura inferior devuelve la siguiente posición ordenada, esto es, la superior. Finalmente, la fórmula INDICE encuentra el valor correspondiente de temperatura para la posición obtenida. Por tanto, la fórmula de cálculo resulta de la siguiente manera (Figura 8.2):

**Figura 8.2. Obtención de la temperatura superior.**

```
=INDICE(TablaC1[[Temperatura de bulbo seco del aire exterior °C]:  
[Potencia declarada para cálculos '[kW']]];COINCIDIR(Tj;  
TablaC1[Temperatura de bulbo seco del aire exterior °C])+1;1)
```

No obstante, para el caso de la temperatura superior, puede ocurrir que esta sea mayor a la temperatura D (la temperatura máxima de la que se disponen datos), en este caso la norma especifica que se ha de realizar una extrapolación entre D y la temperatura siguiente inferior. En la ecuación esto se resuelve con una condición SI.ERROR, que engloba las fórmulas INDICE y COINCIDIR, y en caso de error devuelve la misma ecuación pero en lugar de utilizar la posición que devuelve COINCIDIR sumándole una unidad, utiliza dicha posición restándole una unidad (esto es, devuelve la posición anterior a la inferior).

Al igual que para el caso de la temperatura inferior, existe la posibilidad de que la temperatura sea inferior a la mínima de funcionamiento, caso en el cual no se devolvería ningún valor (ya que por debajo de TOL la bomba de calor no funciona). Esto se contempla con una condición SI, que en caso de que la temperatura sea superior a TOL devuelve los valores resultado de la condición SI.ERROR, y en caso contrario "---", tal como se muestra en la siguiente Figura 8.3:

```
=SI(Tj>TOL;SI.ERROR(INDICE(TablaC1[[Temperatura de bulbo seco del aire exterior °C]:[Potencia declarada para cálculos 'kW']]);COINCIDIR(Tj;TablaC1[Temperatura de bulbo seco del aire exterior °C])+1;1);INDICE(TablaC1[[Temperatura de bulbo seco del aire exterior °C]:[Potencia declarada para cálculos 'kW']]);COINCIDIR(Tj;TablaC1[Temperatura de bulbo seco del aire exterior °C])-1;1));"---")
```

**Figura 8.3. Fórmula completa de cálculo de la temperatura superior.**

Una vez obtenidas las temperaturas superior e inferior el proceso a seguir resulta sencillo. Para obtener los valores de potencia declarada y COPbin(Tj) simplemente se emplean las mismas fórmulas que para el caso de las temperaturas, pero modificando la columna de la tabla C.1 buscada, de tal forma que la columna buscada se corresponda en dicha tabla a los valores de potencia declarada o de COP, según el caso.

Una vez hecho esto, se nombra cada una de las columnas con sus respectivas denominaciones (temperatura superior, temperatura inferior, potencia declarada a temperatura superior, potencia declarada a temperatura inferior, COP a temperatura superior y COP a temperatura inferior).

De esta manera, en la columna de la tabla "Carga de calefacción cubierta por la bomba de calor" puede introducirse la función de interpolación de forma simplificada, con el intervalo entre las temperaturas superior e inferior, tal como se muestra a continuación (Figura 8.4):

```
=SI(Tj>TOL;(Tj-T_inferior)/(T_superior-T_inferior)*(Pd_superior-Pd_inferior)+Pd_inferior;"---")
```

**Figura 8.4. Cálculo de Excel de la carga de calefacción cubierta por la bomba de calor.**

De forma análoga a esta, pero empleando los valores de COP, se obtiene la columna del



$COP_{bin}(T_j)$ .

Adicionalmente en la expresión se incluye la temperatura bivalente y límite de funcionamiento, ya que dado que su posición es variable según el caso de estudio pueden encontrarse en cualquier posición (Figura 8.5):

```
=SI(Tj=Tbiv;Pd_Tbiv;SI(Tj=TOL;Pd_TOL;SI(Tj>TOL;(Tj-T_inferior)/(T_superior-T_inferior)*  
(Pd_superior-Pd_inferior)+Pd_inferior;"---"))
```

**Figura 8.5. Cálculo de Excel de la carga de calefacción cubierta por la bomba de calor considerando TOL y Tbiv.**

Una vez hecho esto se tiene resuelto el problema, de forma global y sencilla, ya que para la obtención del SCOPon y SCOPnet tan solo resta continuar los pasos señalados en la norma, con cálculos simples.

Se obtiene la carga de calefacción multiplicando el factor de carga, para cada caso, por el valor de potencia a temperatura de diseño. Restándole a este valor el obtenido de la potencia declarada se obtiene la carga del calefactor eléctrico de reserva.

Para el caso del SCOPon se obtiene la demanda de calefacción anual multiplicando las horas de funcionamiento por la carga de calefacción, y la aportación de energía anual incluyendo calefactor eléctrico de reserva y se obtiene el SCOPon de acuerdo a la expresión (Ec. 4).

En cuanto al SCOPnet se calcula de acuerdo con la fórmula comentada en la ecuación (Ec. 3).

### 8.1.1. Datos declarados (Potencia y COP)

Una vez diseñado el programa base se ha de proceder al siguiente paso en la programación del Excel, esto es, el cálculo del SCOPnet y SCOPon de máquinas térmicas disponibles en el mercado. Hasta este momento se ha trabajado tomando como punto de partida el ejemplo de la norma UNE, el cual presenta como datos conocidos todos los valores necesarios para el cálculo. No obstante, esta situación no se dará en muchas ocasiones, ya que los fabricantes, en los documentos técnicos de sus bombas de calor, presentan los datos de forma muy variada, haciéndose necesaria en múltiples ocasiones la realización de operaciones previas y tratamiento de datos para calcular los parámetros imprescindibles para la obtención de los rendimientos.

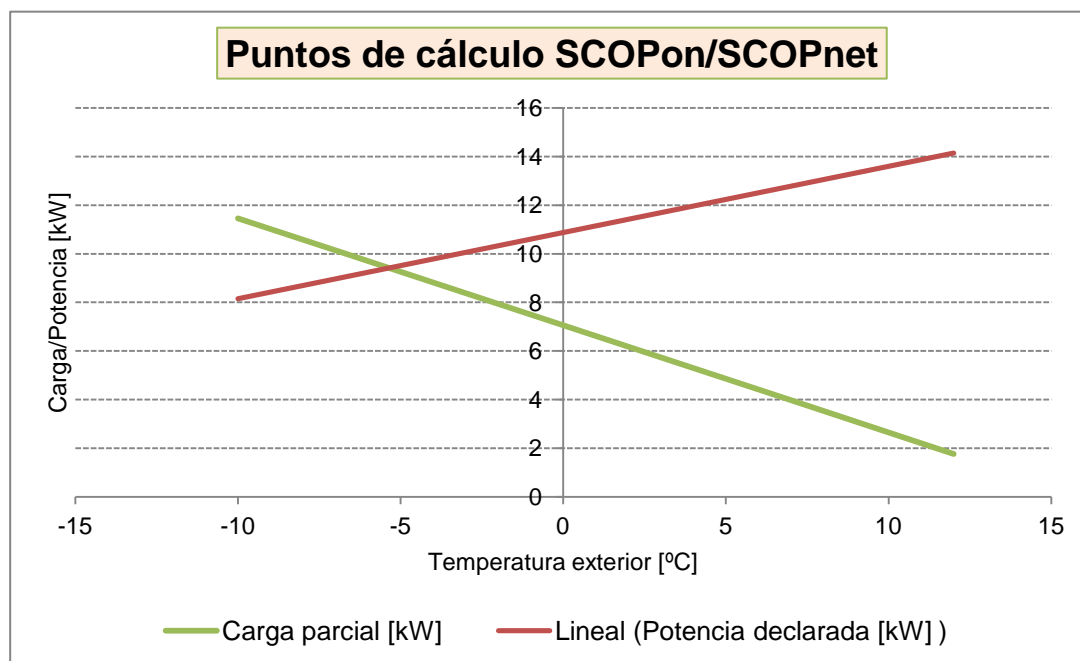
El objetivo de este programa de cálculo es facilitar y simplificar la tarea del usuario, de manera que este haya de efectuar el mínimo número de cálculos posibles. Por lo tanto, se ha de realizar un estudio pormenorizado de las fichas técnicas que ofrecen las diversas



marcas comercializadoras de bombas de calor, analizando los datos que presentan y cómo se ha de proceder en el tratamiento de los mismos para hallar el SCOPon y el SCOPnet.

A la hora de realizar las mediciones de valores de potencia, así como la presentación de los resultados en formato de tablas de valores, se ha de tener en consideración el modo de funcionamiento de la máquina térmica objeto de estudio. De esta manera, se puede diferenciar, a nivel general, entre bombas de calor que trabajen a potencia fija o a potencia variable. Para explicar las diferencias, en lo que respecta al cálculo del SCOPon y SCOPnet, entre estos dos modos de funcionamiento, se hace uso de la representación gráfica de los valores de carga parcial y potencia declarada frente a la temperatura exterior.

Primeramente, las bombas de calor que trabajan a potencia fija, esto es, que no existe una variación de potencia en función de la demanda. Esta tipología de máquina térmica, cuyo uso se está abandonando frente a las posibilidades que ofrecen las máquinas de potencia variable, se pone en funcionamiento dando su máxima potencia, es decir, al 100 % de su capacidad y, cuando alcanza la temperatura de consigna simplemente para. La norma UNE presenta un ejemplo de máquina de este tipo en su Anexo C, calculando sus valores de SCOPon y SCOPnet. Se parte de este ejemplo para obtener la gráfica de potencia y carga frente a la temperatura (Gráfica 8.1), que resulta de la forma:



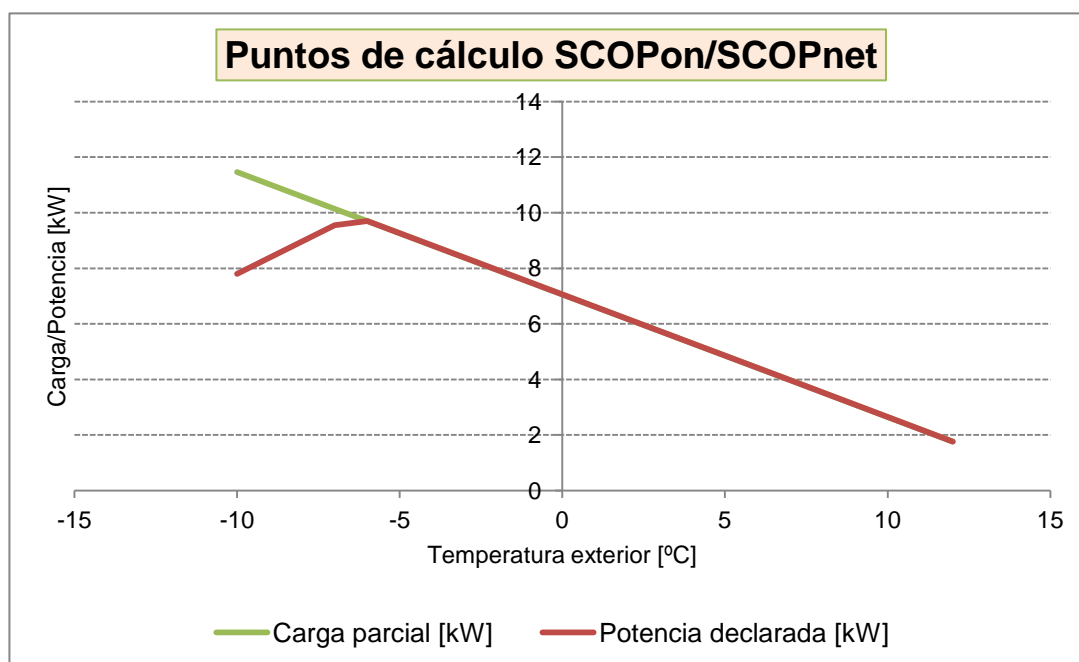
**Gráfica 8.1. Puntos de cálculo para el SCOPon y SCOPnet para una bomba de potencia fija.**

Se ha de señalar que los valores de potencia declarada son los indicados en la norma, con una aproximación de dos decimales. La consecuencia de emplear estos valores de dos decimales para la creación de la gráfica resulta en que la curva de potencia declarada no es

una recta exacta, si no que es una curva. No obstante, a efectos del cálculo, se opta por utilizar una aproximación lineal a susodicha curva.

Tal como se observa en la Gráfica 8.1, la potencia declarada incrementa su valor conforme aumenta la temperatura exterior. El punto de cruce entre la recta de carga parcial y potencia declarada representa la temperatura a partir de la cual la máquina térmica puede dar el 100% de la demanda (carga parcial), es decir, cubrir las necesidades de potencia sin necesidad de un calefactor eléctrico adicional. Se observa, tal como se ha explicado, que en el caso de las bombas de calor de potencia fija no existe regulación de potencia, de manera que la potencia que da la bomba de calor (potencia declarada), es siempre máxima, y una vez que supera el valor de la carga parcial (demanda) sigue aumentando. Para el caso de las bombas de calor con potencia variable este comportamiento es diferente, ya que son capaces de adaptar su curva de potencia declarada a la de carga parcial.

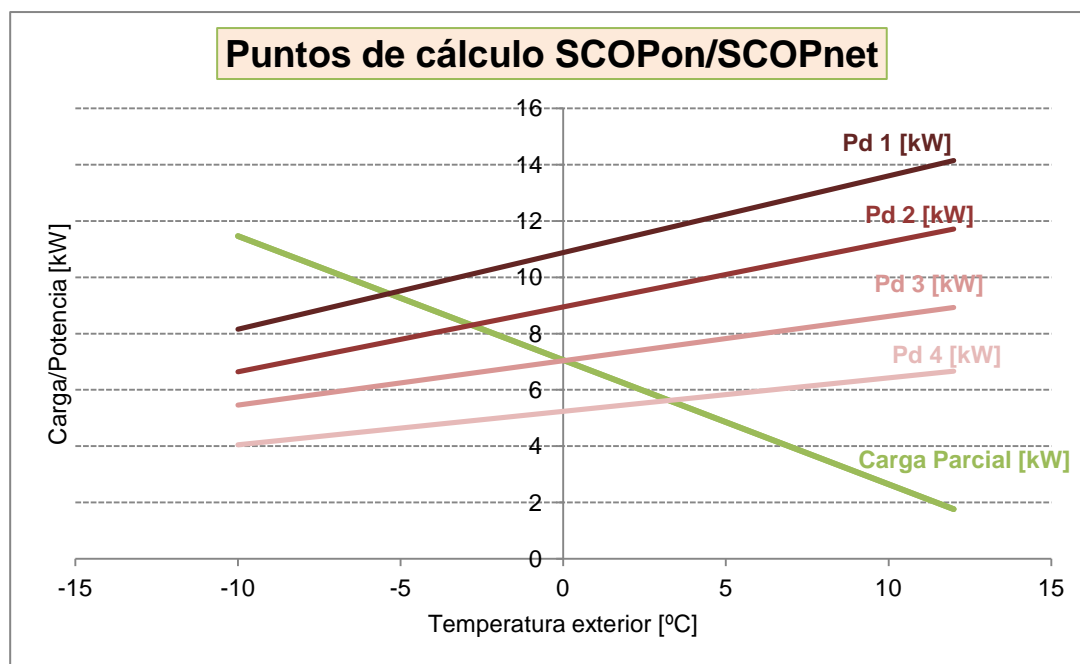
A continuación se muestra la gráfica para el caso de que la bomba de calor presente regulación de potencia, modificando la potencia generada según la demanda. Con este tipo de sistemas se consigue un control de la temperatura mucho más preciso, disminuyendo asimismo los paros y puestas en funcionamiento del sistema (ya que en lugar de parar el sistema al alcanzar la temperatura de consigna se regula la potencia entregada), de manera que el desgaste del mismo será menor. Es por estas razones que en la actualidad la mayoría de las nuevas instalaciones optan por este tipo de sistema.



**Gráfica 8.2. Puntos de cálculo para el SCOPon y SCOPnet para una bomba de potencia variable.**

En la Gráfica 8.2 se muestra un ejemplo de cómo resultaría la gráfica en el caso de que la bomba de calor estudiada (la del ejemplo de la norma) presentase una potencia variable. Así, se observa que a bajas temperaturas la carga parcial supera a la potencia declarada, de manera que se hace necesario el uso de un calefactor eléctrico de reserva. No obstante, a la temperatura bivalente ( $-6^{\circ}\text{C}$  para el ejemplo estudiado), la carga parcial y la potencia declarada se igualan. A partir de este valor la potencia declarada se adapta a la carga parcial requerida, de manera que la máquina, en lugar de trabajar al 100% de su capacidad, lo hace regulando la potencia y disminuyendo el consumo, alcanzando así las necesidades requeridas al mismo tiempo que se reduce el consumo.

Adicionalmente a esta tipología de bomba de calor con potencia variable, existe otro tipo de máquina que también permite la adaptación de la potencia, y lo hace mediante la utilización de varias etapas, esto es, en lugar de presentar una única curva para la potencia declarada que se adapta a la demanda, presenta la posibilidad de trabajar con varias curvas de potencia, eligiendo trabajar en una u otra curva según las necesidades.



**Gráfica 8.3. Puntos de cálculo para el SCOPon y SCOPnet para una bomba de calor con varias etapas de potencia.**

Tal como se observa en la Gráfica 8.3, la bomba de calor del ejemplo presenta 4 etapas, de manera que en función de los valores de carga parcial, se ha de adoptar una u otra curva de potencia declarada (en la gráfica dichas curvas son lineales ya que se trata de un ejemplo, para mayor sencillez de resolución, pero en la práctica son curvas). Esta tipología de funcionamiento para bombas de calor representa un cierto grado de complejidad añadido, ya que para realizar los cálculos se ha de elegir la etapa de funcionamiento para cada

condición de carga parcial.

Con esta clasificación general de los modos de funcionamiento que pueden presentar las bombas de calor del mercado se demuestra que, dependiendo de la tipología, los datos declarados por el fabricante se presentarán de una forma u otra. Por lo tanto se deduce que será necesario modificar el programa de Excel para que este sea capaz de resolver cualquiera de las posibilidades.

### 8.1.2. Procedimiento según tipología de equipo

Se considera que el procedimiento más adecuado para introducir los cambios necesarios en el programa es mediante la aplicación de casos reales, es decir, mediante el cálculo para diferentes bombas de calor del mercado, que presenten uno u otro modo de funcionamiento. A partir de estas resoluciones se obtendrá un método general que pueda resolver cualquier casuística. Por tanto se procede a la búsqueda y estudio de los datos proporcionados por distintos fabricantes, analizando el modo de funcionamiento para cada caso, y procediendo a la resolución del problema de acuerdo con ello.

#### a) Caso bomba de calor aire-agua con tecnología Inverter

Primeramente se estudia el caso de una bomba de calor con regulación de potencia, para la cual se muestran los datos de las bombas de calor de forma estandarizada y tal como indica la norma UNE 14825 en su apartado “11. Ficha Técnica” y el Anexo G con la presentación del modelo de ficha técnica.

De esta manera, se presentan las tablas según el clima (medio, frío o cálido), con los datos en función de la temperatura de salida del agua. Así quedan definidos los tres principales parámetros necesarios a la hora de realizar los cálculos. Se tiene conocimiento de la temperatura, el clima y el tipo de unidad (bombas de calor del tipo aire-agua, tal como se muestra en la Tabla 8.8). Con estos datos el Excel genera la tabla de condiciones de carga parcial para el cálculo del SCOP correspondiente de la norma.

**Tabla 8.8. Tipología de bomba estudiada y potencia de diseño de la misma. Fuente: Hitachi (13).**

Descripción del producto	Bomba de calor aire-agua	-	Sí					
	Calefactor combinado con bomba de calor	-	No					
	Bomba de calor de baja temperatura	-	No					
	Calefactor complementario	-	No					
Capacidad de diseño ( $P_{DESIGN}$ )		kW	11,0	11,0	14,0	14,0	16,0	16,0

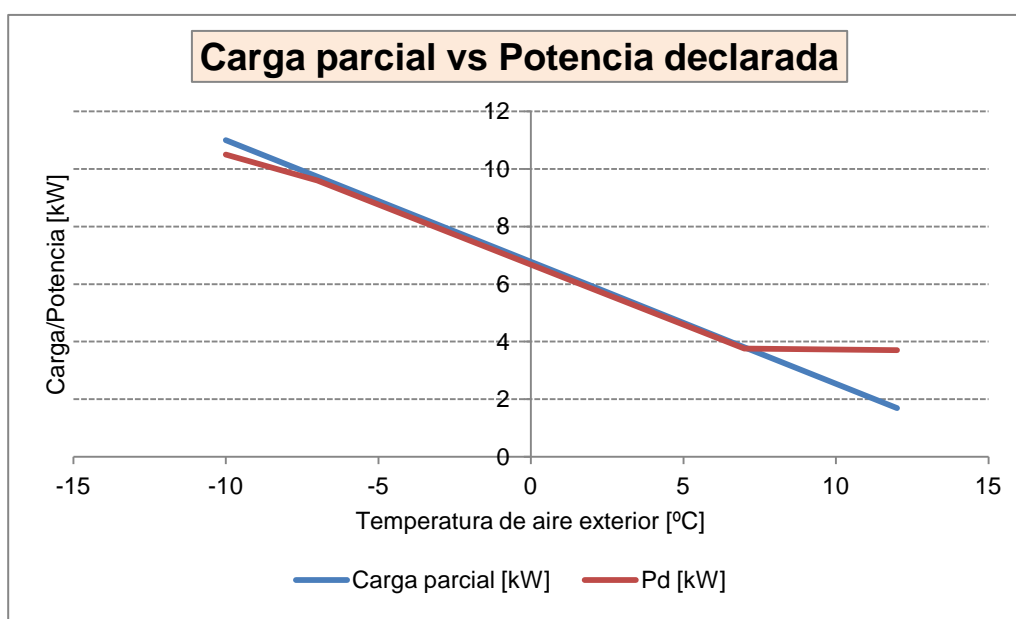
Asimismo, en las tablas figuran los datos de potencia declarada y COPd para las distintas estaciones de calefacción (A, B, C, D, TOL y Tbiv), tal y como se muestra en la Tabla 8.9. La temperatura límite de funcionamiento y la bivalente también están definidas, así como el

coeficiente de degradación para cada caso y la potencia de diseño.

**Tabla 8.9. Valores de COP<sub>d</sub>, Pd, T<sub>biv</sub> y TOL para un ejemplo de bomba de calor Hitachi (13).**

Temperatura exterior (Tj) = -7°C	Pdh	kW	9,60	9,73	12,00	12,38	13,80	14,15
	COP <sub>d</sub>	-	2,74	2,30	2,55	2,19	2,40	2,05
Temperatura exterior (Tj) = +2°C	Pdh	kW	5,84	5,92	7,30	7,54	8,40	8,62
	COP <sub>d</sub>	-	5,20	3,60	4,70	3,10	3,90	2,95
Temperatura exterior (Tj) = +7°C	Pdh	kW	3,76	3,81	4,70	4,85	5,40	5,54
	COP <sub>d</sub>	-	5,80	4,70	5,70	4,60	5,00	4,60
Temperatura exterior (Tj) = +12°C	Pdh	kW	3,70	3,60	3,50	4,10	3,50	4,10
	COP <sub>d</sub>	-	6,40	6,00	6,00	6,40	6,00	6,40
Temperatura exterior (Tj) = Temperatura bivalente (T <sub>biv</sub> )	Pdh	kW	9,60	11,00	12,00	14,00	13,80	16,00
	COP <sub>d</sub>	-	2,74	2,20	2,55	2,12	2,40	1,90
Temperatura exterior (Tj) = Temperatura límite de funcionamiento (TOL)	Pdh	kW	10,50	11,00	12,10	14,00	14,10	16,00
	COP <sub>d</sub>	-	2,65	2,20	2,50	1,40	2,30	1,50
Temperatura bivalente (T <sub>biv</sub> )		°C	-7	-10	-7	-10	-7	-10
Temperatura límite de funcionamiento (TOL)		°C	-10	-10	-10	-10	-10	-10

De esta manera, si se elabora el gráfico que representa los valores de carga parcial (calculados a partir de la potencia de diseño y los factores de carga para cada condición de carga) frente a las potencias declaradas que presenta el fabricante se obtiene:



**Gráfica 8.4. Gráfica que compara la carga parcial con la potencia declarada para una bomba de calor Hitachi, modelo RAS-4WHNPE.**

Tal como se observa en la Gráfica 8.4, el modo de funcionamiento de la bomba de calor se corresponde con el de potencia variable, adaptando los valores de potencia declarada a la carga parcial desde el instante en el que la bomba de calor puede cubrir el 100% de la demanda (temperatura bivalente, en este caso, -7°C). Adicionalmente, en la gráfica se aprecia un cambio en la tendencia a partir de la temperatura de aire de 7°C, momento en el

que, en lugar de seguir disminuyendo tal como hace la recta de carga parcial, se mantiene aproximadamente estable. Este hecho se corresponde con el límite inferior de funcionamiento de la máquina térmica.

Para concluir este apartado, con todos los datos presentados por el fabricante no se hace necesaria ninguna modificación del Excel, ya que tan solo es necesario escribir dichos datos en las celdas donde se requieren y el programa calcula de forma automática el resultado del SCOPon y SCOPnet.

#### **b) Caso bomba de calor con varias etapas**

A continuación se muestra el caso de que la información técnica disponible no se presente de la misma manera que en el caso anterior estudiado, sino que se haga necesaria la realización de una serie de cálculos intermedios para poder obtener los datos tal como se requieren en el Excel.

Los valores de potencia declarada (capacidad) y de COP vienen dados para una serie de temperaturas de aire ambiente y temperaturas de salida de agua. A la hora de realizar el cálculo del SCOPnet y SCOPon tan solo se necesitan los valores de potencia declarada y COP para las temperaturas de aire y de salida de agua correspondientes a las estaciones de referencia A, B, C, D, TOL y Tbiv, de manera que hay que hallar dichos valores en la tabla facilitada por el fabricante. No obstante, existe la posibilidad de que dichos valores no se encuentren en la tabla de forma directa, sino que habrá que realizar interpolaciones entre el valor buscado y los datos de la tabla.

Por tanto, en este caso los valores de potencia declarada y COPd no se presentan en la documentación como datos conocidos, por lo que se ha de realizar una serie de cálculos intermedios.

Asimismo, las bombas de calor del caso estudiado presentan la posibilidad de trabajar en tres etapas o step (step 7, step 4 y step 1). El step 7 se corresponde con los requerimientos de “*maximum performance*”, esto es, mayores valores de potencia declarada, mientras que el step 1 se refiere al mínimo y el step 4 al medio. De esta manera, según sea el caso, los datos de COP y potencia declarada de la estación se corresponderán con los valores de uno u otro step. La elección del mismo se realiza por comparación con la carga parcial, debiendo la potencia declarada de aproximarse en un diez por ciento (mayor o menor) a dicha carga parcial. En caso de que no se encuentre en este intervalo para ningún caso se tomarán los valores extremos (step 7 para el caso de que la carga parcial sea mucho mayor a la potencia declarada y step 1 en caso de que la potencia declarada supere en un alto porcentaje a la carga parcial).

En la Tabla 8.10 se muestra un ejemplo de la presentación de datos, para el modelo de

bomba de calor compacta PUHZ-W50VHA(-BS) de Mitsubishi. En dicha tabla puede observarse la gran variedad de modos de funcionamiento que presenta la máquina térmica. Asimismo, se señala un rango de funcionamiento poco recomendable (tonalidad gris).

**Tabla 8.10. Extracto de tabla "Heating performance data", para el modelo PUHZ-W50VHA(-BS). Fuente: Ecodan Mitsubishi (14).**

Water outlet temperature [°C]		25		35		40		45		50		55		60	
Ambient temperature [°C]		Capacity	COP	Capacity	COP	Capacity	COP	Capacity	COP	Capacity	COP	Capacity	COP	Capacity	COP
STEP7	-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-15	-	-	3.50	2.24	3.50	2.06	3.50	1.87	-	-	-	-	-	-
	-10	4.24	2.88	4.13	2.55	4.13	2.32	4.13	2.10	4.23	1.94	4.34	1.78	-	-
	-7	5.20	3.19	4.50	2.73	4.50	2.49	4.50	2.24	4.50	2.05	4.50	1.85	-	-
	2	5.15	3.40	5.00	3.13	5.00	2.85	5.00	2.56	4.99	2.31	4.97	2.05	4.97	1.74
	7	5.30	5.15	5.00	4.10	5.00	3.66	5.00	3.21	5.00	2.89	5.00	2.56	5.00	2.14
	12	5.34	5.85	5.04	4.57	5.03	4.01	5.03	3.44	5.08	3.06	5.12	2.68	5.12	2.24
	15	5.35	6.28	5.06	4.84	5.06	4.22	5.05	3.59	5.12	3.17	5.20	2.74	5.20	2.30
STEP4	20	5.37	7.00	5.10	5.31	5.09	4.57	5.08	3.82	5.20	3.34	5.32	2.86	5.32	2.40
	-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-15	-	-	2.93	2.44	2.86	2.20	2.78	1.96	-	-	-	-	-	-
	-10	3.58	3.17	3.45	2.77	3.36	2.48	3.27	2.19	3.36	1.99	3.45	1.79	-	-
	-7	3.91	3.41	3.76	2.96	3.67	2.65	3.57	2.33	3.55	2.13	3.53	1.92	-	-
	2	3.43	3.97	3.27	3.17	3.48	3.03	3.68	2.88	3.72	2.60	3.76	2.32	3.76	1.98
	7	3.81	5.54	3.46	4.22	3.62	3.81	3.77	3.40	3.79	3.01	3.80	2.62	3.80	2.42
	12	3.85	6.21	3.54	4.90	3.67	4.28	3.80	3.65	3.81	3.21	3.82	2.77	3.82	2.53
STEP1	15	3.90	6.68	3.58	5.32	3.70	4.56	3.83	3.81	3.83	3.34	3.82	2.87	3.82	2.59
	20	3.94	7.54	3.66	6.00	3.76	5.03	3.86	4.06	3.85	3.54	3.84	3.02	3.84	2.70
	-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-7	2.90	3.52	2.80	2.99	2.75	2.67	2.70	2.35	2.62	2.12	2.53	1.89	-	-
	2	2.97	4.16	2.73	3.59	2.95	3.23	3.17	2.86	2.78	2.54	2.39	2.21	-	-
	7	2.98	5.69	2.83	4.64	3.00	4.03	3.17	3.41	3.17	3.07	3.17	2.73	-	-
	12	3.01	6.59	2.87	5.26	3.02	4.49	3.17	3.73	3.32	3.32	3.47	2.91	-	-
	15	3.01	7.06	2.90	5.64	3.03	4.78	3.17	3.91	3.41	3.46	3.66	3.01	-	-
	20	3.08	7.78	2.94	6.26	3.06	5.25	3.17	4.23	3.57	3.71	3.66	3.19	-	-

Se deduce, por tanto, que para este tipo de bomba de calor sí se ha de modificar el Excel y acondicionarlo para el tratamiento de datos. El modo de proceder para la introducción de estos cambios será mediante la resolución del problema (tratamiento de datos y cálculo del SCOPnet) para una máquina concreta, y posteriormente ampliar las posibilidades del programa de manera que acepte unos datos diferentes a los introducidos para este ejemplo concreto. El objetivo es que el programa sea capaz de realizar los cálculos independientemente del formato en el que se presenten los datos, por eso se parte de un caso concreto y posteriormente se procederá a la homogenización del método, de forma que sea aplicable a otras marcas.

Primeramente se decide crear una hoja adicional en el Excel, que recibirá el nombre de "Tratamiento datos", y que será donde el usuario introducirá los datos del fabricante. Los parámetros principales y a partir de los cuales se determinan las condiciones de temperatura interior (clima, temperatura y tipo de unidad), que previamente se encontraban en la hoja "ANEXO C", se introducirán directamente en esta nueva hoja, así como los valores de temperatura de diseño y potencia a la temperatura de diseño.

A continuación se introduce la tabla de valores de COP y potencia declarada en función de la temperatura de aire ambiente y la temperatura de salida de agua. Se decide que la configuración de dicha tabla será colocando como filas los valores de temperaturas de aire



ambiente y como columnas los valores de temperatura de salida de agua. Ambos parámetros serán ordenados de menor a mayor. Para el caso de los step o etapas, se introducirá primeramente el step correspondiente la máxima potencia y se irá descendiendo.

La temperatura de salida de agua queda definida para cada estación de acuerdo con la normativa una vez se introducen los valores de clima, temperatura y tipo de unidad (el Excel selecciona la tabla de la norma correspondiente en función de estos tres parámetros). Una vez definidos estos valores se ha de buscar en la tabla los valores de COP y Pd. En el caso de que las temperaturas de las estaciones y de salida de agua coincidan con los datos de la tabla, el valor de COP y potencia declarada se obtiene directamente, pero en caso de que uno o ambos valores no coincidan debe realizarse una interpolación, simple o doble según el caso. Adicionalmente se presenta el problema de que dependiendo de los requerimientos se deberá de elegir entre una u otra etapa.

Se toma la decisión de realizar el cálculo de potencia y COP para cada estación y cada etapa, y posteriormente realizar la elección del step. Por tanto, el Excel deberá realizar las interpolaciones para las 7 condiciones de carga, tanto para el cálculo del COP como de Pd, y para cada step.

Si bien es cierto que puede darse el caso de que la temperatura de aire, o la temperatura de salida de agua coincidan con los valores de la tabla, se ha decidido, de cara a realizar un trabajo que resuelva los cálculos en caso de que los datos introducidos sean otros, realizar para todos los casos una doble interpolación. Para mayor comprensión, en el caso que nos ocupa, para la situación de la condición de carga parcial A la temperatura de aire ambiente es de  $-7^{\circ}\text{C}$ , y la temperatura de salida de agua (con clima A y temperatura baja), es de  $34^{\circ}\text{C}$ . Observando la Tabla 8.10 se aprecia que la temperatura de aire es dato, mientras que la temperatura de agua es necesario interpolarla. No obstante el Excel realizará también de manera automática la interpolación de la temperatura de aire (entre ella misma y la temperatura superior, esto es,  $2^{\circ}\text{C}$ ). De esta manera el resultado sigue siendo el mismo (sigue devolviendo los valores de COP y Pd a  $-7^{\circ}\text{C}$ ), pero se deja abierta la posibilidad a que en el rango de temperaturas de aire de la tabla no se encuentre el valor de  $-7^{\circ}\text{C}$  (por ejemplo  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $2^{\circ}\text{C}$ ), de forma que el programa resuelva el problema igualmente.



Así, para el caso del primer step y de la primera estación de referencia, la interpolación resulta de la forma presentada en la Tabla 8.11:

**Tabla 8.11. Interpolación de la potencia declarada y del COP para la estación de referencia A.**

	Potencia declarada [kW]			COP declarado		
	Temperatura salida agua [°C]			Temperatura salida agua [°C]		
Temperatura A [°C]	25	35	34	25	35	34
-7	5.2	4.5		3.19	2.73	
2	5.15	5		3.4	3.13	
-7	5.2	4.5	4.57	3.19	2.73	2.776

Primeramente se realiza la búsqueda de los valores inferior y superior de las temperaturas de aire ambiente y de salida de agua. Para el caso de la primera, la temperatura se busca empleando la fórmula de Excel BUSCARV, introduciendo "ToA" (temperatura a carga parcial A) como valor buscado, la columna de temperaturas de aire ambiente de la tabla de datos como matriz de búsqueda, y el indicador de columnas 1 que señala la posición del valor buscado en la matriz. Para la temperatura superior se utiliza la fórmula INDICE, introduciendo la columna de temperaturas de aire como matriz y la función COINCIDIR como indicador de fila. Esta segunda función es análoga al BUSCARV anterior, pero en lugar de devolver un valor devuelve una posición, por esta razón se introduce el mismo código que en el caso anterior y se le suma una posición a la fórmula COINCIDIR, puesto que las temperaturas están ordenadas de menor a mayor la fórmula devuelve el valor siguiente al inferior de temperatura de aire, esto es, el valor superior.

Para el caso de las temperaturas de salida de agua, la temperatura inferior se calcula con la fórmula BUSCARH, análoga a BUSCARV pero para una presentación de datos en una fila en lugar de una columna. Para la temperatura superior se hace servir igualmente la combinación de las fórmulas INDICE y COINCIDIR. Para estos dos cálculos se contempla la posibilidad de que la temperatura de salida de agua sea menor a todos los valores del rango, de manera que se ha de realizar una extrapolación. Este problema se resuelve utilizando la condición SI, que en el caso de que no encuentre un valor inferior de temperatura automáticamente devolverá el mínimo valor de temperatura para el caso de la temperatura inferior y el segundo valor para el caso de la temperatura superior.

Una vez obtenidos los valores de temperatura inferior y superior tanto de aire ambiente como de salida de agua se ha de hallar los valores de COP y potencia que se corresponden con cada uno y que serán utilizados para las interpolaciones. Esto se resuelve de forma

sencilla utilizando la fórmula BUSCARV que busca el valor de temperatura de aire dado, dentro de la matriz completa para la etapa (la matriz con todos los datos de temperaturas de aire, de agua y valores de Pd o COP según el caso), y como indicador de columnas de búsqueda emplea la fórmula COINCIDIR, que busca de entre las temperaturas de salida de agua el valor correspondiente. Una vez hecho este procedimiento para las dos temperaturas de aire y las dos temperaturas de agua, se obtienen 4 valores de Pd o COP, que se han de interpolar dos veces, una con las temperaturas de aire y otra con las de agua, hasta obtener el resultado final. Estas dos últimas operaciones se resuelven con la fórmula PRONOSTICO.

Para el caso de las etapas o step siguientes la obtención de los valores de COP y Pd conforme a la temperatura de aire y de agua se complica, debido al proceso de introducción de la tabla de datos. Dicha tabla presenta los valores de temperatura de aire como filas, repitiendo los valores de temperatura de cada estación para cada step. Sin embargo, los valores de temperatura de agua se presentan como columnas y tan solo una vez, no repitiendo dichos valores para cada step. De esta manera, si se efectúa el cálculo anterior, por ejemplo para el step número 2, al realizar la búsqueda combinada de temperatura de aire y de agua la fórmula puede hallar dos valores, el correspondiente al step 1 y el correspondiente al step 2 (lo mismo ocurre para el step 3, etcétera). Por tanto se ha de hallar alguna manera de indicar al Excel que busque los datos en la etapa que se corresponda. Esto se resuelve introduciendo una columna adicional, llamada auxiliar y que posteriormente se ocultará, la cual combina el nombre del step correspondiente con el de la temperatura de aire (por medio del signo &). Seguidamente se hace uso de la fórmula DESREF, que emplea como referencia a su vez la combinación de las fórmulas INDICE y COINCIDIR, que hayan el valor de temperatura de agua para cada caso, y como valor de fila introduce de nuevo la fórmula COINCIDIR, que busca en la tabla auxiliar el valor de etapa y temperatura de aire dado.

Una vez resueltas las interpolaciones el siguiente paso es el de elección de la etapa para cada condición de carga. La norma UNE-EN 14825 señala que, para el caso de unidades de control de potencia variable, la potencia declarada de la etapa ha de alcanzar en +/-10% el valor de carga parcial. De esta manera, el Excel ha de realizar una comparación entre los valores de potencia declarada para cada etapa y el valor de carga parcial. La etapa elegida será la que cumpla con este requisito. Esta elección se resuelve de forma sencilla en el Excel por medio de la condición SI, tal como se observa en la siguiente Figura 8.6:

```
=SI.ERROR(SI((Carga_A-M198)/Carga_A<0.1;"Etapa 4";SI((Carga_A-M162)/Carga_A<0.1;"Etapa 3";SI((Carga_A-M126)/Carga_A<0.1;"Etapa 2";"Etapa 1"));"---")
```

**Figura 8.6. Fórmula de elección de etapa.**

En la figura, los valores de M198, M162 y M126 representan los valores de potencia declarada para cada etapa de estudio. Una vez seleccionado el step los valores de potencia declarada y de COP serán los correspondientes al mismo. Llegados a este punto el problema queda resuelto y es posible realizar el cálculo del SCOPnet y SCOPon de forma análoga al caso anterior comentado.

Una vez resuelto este ejemplo se ha de proceder a la siguiente fase en la configuración del nuevo Excel, esto es, la adaptación para otros datos. En este caso se supondrá que los datos de partida vendrán representados en tablas, en función de la temperatura de aire y de la temperatura de salida de agua, y separados en diferentes etapas. Sin embargo, las dimensiones de dicha tabla son variables, esto es, los datos no tienen por qué ser 9 valores de temperatura de aire, 7 de agua, y 3 step, como en el ejemplo calculado previamente. Por tanto se ha de crear una herramienta capaz de trabajar con tablas de diferentes dimensiones, que realice los cálculos independientemente de las mismas. La principal dificultad se presenta en la creación de esta tabla de dimensiones variables, ya que la siguiente fase del problema se resolverá de la misma manera que en el ejemplo, puesto que, para las interpolaciones, aunque los valores de temperaturas de aire ambiente y de salida de agua de las tablas nuevas sean diferentes a los del ejemplo, las fórmulas del Excel están escritas de tal manera que encontrarán igualmente las temperaturas superior e inferior, así como los valores de potencia declarada y COPd.

Se considera que la opción más adecuada para la introducción de datos en la tabla es la creación de una tabla de dimensiones elevadas, esto es, con un número de filas y de columnas suficientemente elevado como para que cualquier tabla de fabricante del mercado presente unas dimensiones iguales o inferiores. De esta manera, se introducirán los datos del fabricante en la tabla y las filas o columnas sobrantes recibirán de forma predeterminada un valor de "---". Así, el Excel realizará las interpolaciones con todos los valores de la tabla, pero los valores "---" no serán considerados en el cálculo.

Después de realizar una búsqueda y análisis de diferentes ejemplos de bombas de calor que presenten los datos en tablas, se decide crear una tabla con dimensiones máximas de 10 filas (o temperaturas de aire ambiente), y 10 columnas (o temperaturas de salida de agua). Es necesario destacar que la introducción de los datos en la tabla ha de ser ordenada de menor temperatura a mayor.

En cuanto a las dimensiones mínimas de la tabla, se ha de considerar cuál es el número mínimo de valores de temperatura necesarios para definir de forma correcta las condiciones de carga parcial, esto es, cuál es el mínimo de datos necesarios para realizar las interpolaciones y hallar unos valores de temperaturas, potencias y COP correctos. En este caso, y dada la falta de bibliografía al respecto, se ha optado por un número mínimo de tres valores, si bien se ha de señalar que se trata de un número reducido para realizar las

interpolaciones y el cálculo resultante puede acarrear un cierto error.

Estas dimensiones de tabla representan una etapa, pero como ya se ha comentado previamente existe la posibilidad de que la máquina presente más de una etapa. De esta manera, se predetermina un valor máximo de 4 etapas (lo que implica la adición de 30 filas a la tabla). Estas etapas se ordenarán de mayor capacidad a menor. Una vez creada esta tabla, se aplican las mismas fórmulas de Excel explicadas anteriormente en el ejemplo pero adaptando las dimensiones de la nueva tabla, y siempre colocando valores de "---" en las casillas en las cuales no haya dato. Igualmente se realizarán interpolaciones para las 4 etapas, independientemente de que este devuelva un valor numérico o de "---". Esto es necesario para poder realizar el cálculo para todos los casos, ya que si se da el caso de que haya 4 etapas el Excel devolverá los valores numéricos de forma automática.

Este modo de proceder, creando un número de columnas, filas y step conservador y elevado que permita el cálculo para cualquier situación, presenta el inconveniente del consumo de espacio. Esto es, puede darse la situación de que la bomba de calor estudiada presente unos valores de, por ejemplo, 4 temperaturas de aire ambiente, 4 de salida de agua y 1 etapa. En este caso la tabla creada ocuparía tan solo unas dimensiones de 4x4, mientras que presentaría un elevado número de filas y columnas con el valor de "---". Asimismo, el espacio ocupado por las interpolaciones de las etapas 2, 3 y 4, que devuelven un valor de "---" y no son necesarias para el cálculo, es elevado. Por lo tanto, pese a que los cálculos son correctos, y la herramienta de Excel devuelve los valores adecuados de COP y Pd, se considera que esta resolución no resulta del todo adecuada dado el poco atractivo visual que presenta, ya que el usuario visualizará un elevado número de casillas de la forma "---" que no presentan ningún valor. Para solucionar este inconveniente, se ha llegado a la conclusión que la solución más óptima resulta mediante el ocultamiento de las casillas que presenten los valores sin contenido. Ocultando las filas y columnas lo que se consigue es que el usuario visualice tan solo las celdas con contenido numérico, de forma que independientemente de las dimensiones de la tabla solamente sean visibles los resultados relevantes para el cálculo. Este ocultamiento de filas y columnas se realiza mediante la creación de una macro que, en función de las dimensiones de la tabla, mostrará unos valores u otros.

Para la creación de esta macro se crea una User Form en el Excel, donde se dibujarán 3 casillas, en las cuales se indicarán las dimensiones que ha de tener la tabla. La primera casilla recibe el nombre de "Número de etapas", se refiere al número de etapas que presentan los datos. La segunda casilla, "Número de filas", e indicará el número de temperaturas de aire ambiente que se escribirán en la tabla. Por último, "Número de columnas", representa el número de temperaturas de salida de agua. Según el valor que reciban estas tres variables se ocultarán unas u otras celdas.

Para seleccionar el número que recibirá cada variable se introducirán ComboBox, las cuales presentarán una lista desplegable con sus posibles valores, esto es, con el número de filas, columnas y etapas disponible. Adicionalmente, se incluirá un CommandButton con el título “Aplicar”, el cual será el encargado de generar la tabla una vez se hayan seleccionado las condiciones, y otros tres, con el icono de una pregunta, colocados al lado de cada ComboBox. Si el usuario hace click en uno de estos tres botones se generará una Message Box con un texto explicativo del parámetro al que hace referencia (por ejemplo, si se refiere al número de filas, en el texto se explica que dichas filas se corresponden con el número de temperaturas de aire proporcionadas y que el rango máximo que se puede seleccionar es de 10).

En el código introducido se habrá de programar los posibles valores que recibirán las ComboBox. Así, para el caso de las columnas, el código introducido en la macro es de la forma tal como se muestra en la siguiente Figura 8.7:

```
Private Sub UserForm_Initialize()
    ComboBox1.List = Array(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)
    ComboBox2.List = Array(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)
    ComboBox3.List = Array(1, 2, 3, 4, 5)
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton1_Click()
    Dim NumeroEtapas As Integer
    Dim NumeroFilas As Integer
    Dim NumeroColumnas As Integer
    NumeroEtapas = ComboBox3.Value
    NumeroFilas = ComboBox2.Value
    NumeroColumnas = ComboBox1.Value

    If NumeroColumnas = 3 Then
        Range("U:AA,AF:AL").Select
        Selection.EntireColumn.Hidden = True
    End If
    If NumeroColumnas = 4 Then
        Range("V:AA,AG:AL").Select
        Selection.EntireColumn.Hidden = True
    End If
End Sub
```

**Figura 8.7. User Form y extracto de código para programar ocultamiento de filas y columnas.**

En el código puede observarse que se ha de inicializar la User Form, definiendo los posibles valores de la ComboBox. A continuación, se programa el CommandButton. Para mayor sencillez se crean las variables Numero Etapas, Filas y Columnas. En la figura se presenta una parte del código, concretamente para las columnas. Si se marca la opción 3, significa que tan solo se dispone de 3 columnas con contenido, de manera que se ha de ocultar desde la columna 4 a la 10 (esto para cada etapa). De esta manera se seleccionan las filas a ocultar y con la orden “Selection.EntireColumn.Hidden=True” se ocultan. Para el caso de los diferentes etapas el procedimiento es el mismo pero teniendo en cuenta las filas que se corresponden a cada etapa. Adicionalmente, para este caso, se ocultan también las interpolaciones correspondientes a las etapas, esto es, en caso de que los datos representen tan solo dos etapas, se ocultan las filas de la tabla correspondientes a la etapa 3 y 4, así como las interpolaciones para dichas etapas.

Para el caso del ocultamiento de las filas, el procedimiento es el mismo, pero la orden será de la forma "Selection.EntireRow.Hidden=True".

Adicionalmente, se contempla la posibilidad de que el usuario cometa un error a la hora de introducir las dimensiones de la tabla, y que después de ejecutar la macro sea incapaz de visualizar las filas y columnas que ocultó previamente. Para ello, se introduce un nuevo código en la macro, de manera que si el usuario señala que hay 10 filas, 10 columnas, y la etapa 5, al ejecutar la macro esta devuelva la tabla con dimensiones máximas, es decir, visualizando todas las celdas y columnas de la tabla. Para ello se introduce la misma orden de antes, "Selection.EntireRow.Hidden" (o "Column"), pero que en este caso presenta un resultado de "False".

De esta manera, después de seleccionar las dimensiones de la tabla, el usuario tan solo ha de pulsar este botón y la macro se ejecutará de manera automática, ocultando o mostrando las celdas con cálculos.

Una vez finalizado el cálculo de los valores de COPd y potencia declarada para las estaciones de referencia, tan solo resta introducir estos datos en la tabla de cálculos del SCOP (tabla denominada C.1.), en la hoja de Excel "ANEXO\_C". Se ha de recordar que existen dos posibilidades de tratamiento de datos; en formato de tablas, siendo necesaria la interpolación de los mismos, o acondicionados para el cálculo (se introducen directamente en la tabla). Para seleccionar una opción u otra de forma automática se decide añadir una nueva macro al Excel. Esta macro se asocia a un cuadro de lista, en la hoja "Tratamiento datos", que responde a la pregunta "*¿Se dispone de los datos según la UNE 14825?*" presentando dos opciones de respuesta: sí o no. En caso de que la respuesta sea negativa, la macro mostrará la User Form explicada, para generar la tabla y las interpolaciones, y calcular los valores de COP y Pd que serán introducidos de manera automática en una tabla. Por el contrario, en caso de que la respuesta sea afirmativa, la macro ocultará las celdas de la tabla de datos y de las interpolaciones y mostrará una tabla en la que introducir directamente los datos dados. Finalmente, los valores de la tabla C.1. serán introducidos con una condición SI, en caso de que la respuesta a la pregunta sea afirmativa devolverán de forma automática los valores de la tabla de resultados, mientras que en caso de que sea negativa se devolverán los datos introducidos en la otra tabla.

#### **d) Caso bomba de calor de una etapa. Cálculo del SCOP de referencia**

Se ha encontrado un libro de documentación que presenta una ficha técnica muy detallada de sus productos, en la cual aparecen los datos necesarios para calcular el SCOP de referencia.

Los datos declarados se presentan en tablas para cada condición de carga, así como la



temperatura bivalente y temperatura límite de funcionamiento son dato. Estos valores de potencia y de COP declarados vienen dados para el clima “A”, “W” y “C” según el caso, tal y como se muestra en la Tabla 8.12. Para el caso concreto mostrado puede observarse que el modo de funcionamiento “C” (clima frío o “colder season”) no está disponible para la máquina estudiada.

**Tabla 8.12. Datos declarados de la ficha técnica de una bomba de calor aire/aire Mitsubishi.**

**Fuente: Mitsubishi (15).**

Declared capacity for heating / Average season, at indoor temperature 20°C and outdoor temperature Tj			Declared coefficient of performance / Average season, at indoor temperature 20°C and outdoor temperature Tj		
Tj=7°C	Pdh	4.78 kW	Tj=7°C	COPd	2.90 -
Tj=2°C	Pdh	2.91 kW	Tj=2°C	COPd	4.75 -
Tj=7°C	Pdh	1.87 kW	Tj=7°C	COPd	6.00 -
Tj=12°C	Pdh	1.05 kW	Tj=12°C	COPd	6.50 -
Tj=bivalent temperature	Pdh	5.40 kW	Tj=bivalent temperature	COPd	2.60 -
Tj=operating limit	Pdh	5.03 kW	Tj=operating limit	COPd	2.50 -
Declared capacity for heating / Warmer season, at indoor temperature 20°C and outdoor temperature Tj			Declared coefficient of performance / Warmer season, at indoor temperature 20°C and outdoor temperature Tj		
Tj=2°C	Pdh	6.50 kW	Tj=2°C	COPd	2.80 -
Tj=7°C	Pdh	4.18 kW	Tj=7°C	COPd	5.57 -
Tj=12°C	Pdh	1.86 kW	Tj=12°C	COPd	7.30 -
Tj=bivalent temperature	Pdh	6.50 kW	Tj=bivalent temperature	COPd	2.80 -
Tj=operating limit	Pdh	5.03 kW	Tj=operating limit	COPd	2.50 -
Declared capacity for heating / Colder season, at indoor temperature 20°C and outdoor temperature Tj			Declared coefficient of performance / Colder season, at indoor temperature 20°C and outdoor temperature Tj		
Tj=7°C	Pdh	- kW	Tj=7°C	COPd	- -
Tj=2°C	Pdh	- kW	Tj=2°C	COPd	- -
Tj=7°C	Pdh	- kW	Tj=7°C	COPd	- -
Tj=12°C	Pdh	- kW	Tj=12°C	COPd	- -
Tj=bivalent temperature	Pdh	- kW	Tj=bivalent temperature	COPd	- -
Tj=operating limit	Pdh	- kW	Tj=operating limit	COPd	- -
Tj=-15°C	Pdh	- kW	Tj=-15°C	COPd	- -
Bivalent temperature heating / Average			Operating limit temperature heating / Average		
Tbiv		-10 °C	Tol		-15 °C
heating / Warmer			heating / Warmer		
Tbiv		2 °C	Tol		-15 °C
heating / Colder			heating / Colder		
Tbiv		- °C	Tol		- °C

Con estos valores es posible obtener los resultados de SCOPon y SCOPnet. Adicionalmente, la tabla presenta los valores de potencia para modo desactivado, en espera, termostato apagado y de dispositivo en modo de calentamiento de cárter, los cuales permiten el cálculo del SCOP de referencia. Hasta este momento el Excel creado tan solo permitía el cálculo del SCOPon y SCOPnet, pero a la vista de la posibilidad de ampliar el cálculo y obtener el SCOP de referencia se ha decidido añadir este apartado al programa. De esta manera se incluyen las celdas de potencia citadas, cuyos valores deberá introducir el usuario. Adicionalmente, se copian las tablas de la norma A.4 y A.5, en las cuales se muestran el número de horas necesarios para el cálculo del SCOP de referencia. Tal como se puede observar en la Tabla 8.13, estos datos vendrán dados en función del clima (A, W o C) y del modo de funcionamiento de la bomba de calor (solo calefacción o reversible).

**Tabla 8.13. Tabla A.4 norma UNE 14825. Número de horas utilizado para el cálculo del SCOP de referencia (2).**

	Sólo calefacción			Reversible		
	"A"	"W"	"C"	"A"	"W"	"C"
Modo desactivado (Hoff)	3 672 h	4 345 h	2 189 h	0 h	0 h	0 h
Modo desactivado por termostato (Hto)	179 h	755 h	131 h	179 h	755 h	131 h
En espera (Hsb)	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h
Horas en modo activo equivalentes para calefacción (H <sub>HE</sub> )	1 400 h	1 400 h	2 100 h	1 400 h	1 400 h	2 100 h

Para una mayor agilidad de trabajo en el programa de Excel, la fórmula del SCOP de referencia (Ec. 5), se aplicará conjuntamente con una condición SI que se referenciará a dos parámetros: el clima y el modo de funcionamiento. El parámetro de clima es un parámetro que ya ha sido ampliamente comentado en este texto, y aparece en el Excel en una celda en la cual el usuario ha de decidir de entre los valores de una lista desplegable entre clima medio (A), más cálido (W) o más frío (C), en función de esto la condición SI de Excel elegirá una u otra columna de la tabla Tabla 8.13. Pero, tal como puede observarse, todavía es necesario señalar una segunda condición, esto es, el modo de funcionamiento de la bomba. De esta manera, se crea una nueva celda con una lista desplegable con dos opciones, “Sólo calefacción” en caso de que la bomba de calor solo permita el funcionamiento en este modo, y “Reversible” en el caso que permita también el trabajo en modo de refrigeración.

De esta manera el Excel podrá calcular el valor del SCOP de referencia, aplicando la ecuación (Ec. 5) de forma automática e independientemente del tipo de clima o modo de funcionamiento, siendo tan solo necesario señalar dicho modo y los valores de potencia requeridos para el cálculo. Así, para el caso del ejemplo citado, se obtiene un valor de SCOP de referencia de 4.69 para el caso del clima medio, y se puede observar en la tabla de datos de la ficha técnica que el valor es correcto, pues para el caso de estudio el fabricante propone un valor de 4.7, tal como se observa en la Tabla 8.14. Adicionalmente, se puede realizar el cálculo para el caso del clima más cálido (“Warmer”). Simplemente se ha de modificar en el Excel la pestaña clima, eligiendo de la lista desplegable el clima “W” en lugar de “A” e introducir en la tabla los valores declarados de potencia y COP correspondientes. De esta manera se obtiene un valor de SCOP de referencia de 6, comparándose con el valor que presenta el fabricante de 6.

**Tabla 8.14. Valores de SCOP para los diferentes climas de una bomba de calor Mitsubishi.**  
**Fuente: (15).**

Item	symbol	value	class
Seasonal efficiency and energy efficiency class			
cooling	SEER	7.60	A++
heating / Average	SCOP/A	4.70	A++
heating / Warmer	SCOP/W	6.00	A+++
heating / Colder	SCOP/C	-	-

### 8.1.3. Análisis de resultados

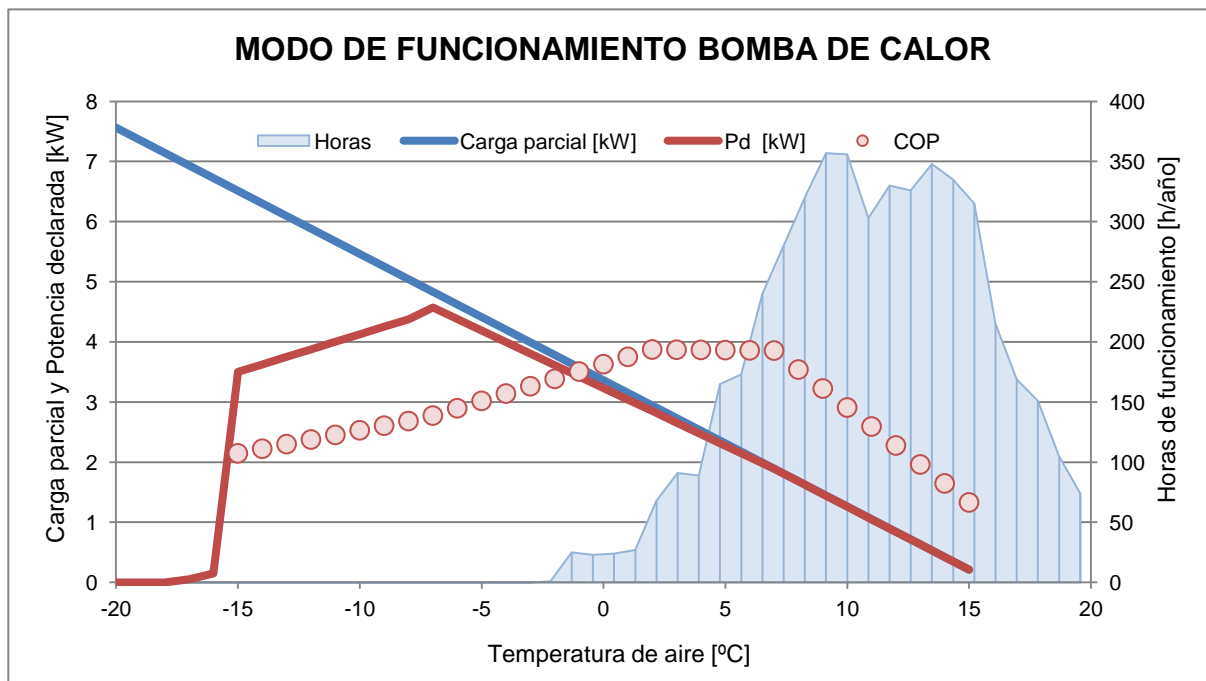
El objetivo del programa de Excel realizado es el de cálculo del rendimiento de la bomba de calor elegida, en modo calefacción o modo refrigeración, de acuerdo a las indicaciones de la norma UNE-EN 14825. Para el caso concreto de modo de calefacción, tal como se ha comentado a lo largo de este trabajo, se ha de obtener el valor del SCOP, SCOPnet y SCOPon de referencia. El valor de SCOP resulta de especial interés dada su vinculación con la consideración o no de la máquina térmica como energía renovable. Esta consideración, comentada previamente en el apartado 5.3, permite al usuario conocer los



niveles de eficiencia de la bomba de calor estudiada, siendo estos un indicativo de la calidad de la misma.

A modo de ejemplo, para el caso de la bomba de calor estudiada en el apartado 8.1.2, tal y como se observa en la Tabla 8.14, se presenta la clasificación correspondiente a los valores de SCOP en clima medio y cálido, así como SEER. Observando la tabla Tabla 5.3, que presenta los coeficientes energéticos, se verifica la clase de cada valor. Así, con el SCOP de 4,7 para clima medio se clasificará como A++, lo cual es considerado un valor bueno de rendimiento. Se observa adicionalmente, que para el clima W (cálido), presenta un mejor resultado de SCOP, correspondiéndose en este caso con la clasificación A+++, la más alta en la escala de valores.

Adicionalmente a la presentación de valores de eficiencia, existen otros parámetros observables a partir de los cálculos realizados, que resultan de interés a la hora de estudiar el comportamiento de las bombas de calor. Un ejemplo de ello es la observación del comportamiento de la bomba de calor en función de las horas de trabajo de la máquina. Así, en la Gráfica 8.5 se observa a qué valores de potencia y de COP la máquina funciona durante más horas. Los valores máximos de COP se encuentran entre 1 y 6 °C de temperatura de aire, pero es a 9 y 10 °C cuando donde la máquina trabaja más tiempo. Se observa igualmente una disminución del valor del COP conforme se aumentan las temperaturas.



**Gráfica 8.5. Gráfico de funcionamiento de una bomba de calor de capacidad variable.**

## 8.2. OBTENCIÓN DEL SEER<sub>on</sub>, SEER DE REFERENCIA

De igual forma que se ha hecho para el caso del SCOP, el programa de Excel ha de presentar la opción de realizar el cálculo del SEER<sub>on</sub> y SEER de referencia.

Tal como se ha comentado en el apartado “7.2. Cálculo en modo refrigeración”, el procedimiento del cálculo del SEER presenta ciertas similitudes con el caso del SCOP, pero los cálculos resultan más sencillos, de tal forma que una vez comprendido y resuelto el problema para el caso del SCOP, la elaboración de la metodología de trabajo para el caso del SEER no implica una gran complicación.

Tal como se ha procedido en el caso del modo de calefacción, primeramente se resolverá el ejemplo que presenta la norma UNE-EN 14825 haciendo uso del programa Excel y posteriormente se procederá a la búsqueda y aplicación de ejemplos comerciales, de tal forma que el programa pueda trabajar con diferentes metodologías de presentación de los datos de cálculo.

Para ello se crea una nueva hoja de Excel con el nombre de SEER, en la cual se introducirán los datos para el cálculo del mismo. Primeramente se genera la tabla B.1 de la norma, que representa la tabla de datos para el cálculo del SEER. Se parte de las temperaturas de carga parcial A, B, C y D, las cuales son constantes para cualquier tecnología de bomba de calor y son de 35, 30, 25 y 20°C. Tal como se ha explicado en el apartado 7.1, se calculan los factores de carga para cada situación de carga parcial haciendo uso de la temperatura de diseño, en este caso de 35°C. Una vez hecho esto, suponiendo conocidos los valores de potencia declarada y EER correspondiente a dichas potencias declaradas, se calcula el EER a carga parcial, haciendo uso del factor de potencia y coeficiente de degradación y teniendo en cuenta la tipología de máquina y funcionamiento, en este caso aire/aire y de potencia fija.

En el ejemplo estudiado, la bomba de calor es del tipo aire/aire, por tanto, para el cálculo del EER<sub>bin(Tj)</sub> se empleará la ecuación (Ec. 14). No obstante, de cara a una mayor automatización del programa de Excel, se introduce una condición SI, de tal forma que en caso que la bomba de calor sea del tipo aire/aire o agua/aire, el programa emplee susodicha ecuación pero, en caso de que sea otra tipología de bomba de calor, el programa devuelva la ecuación (Ec. 16). La tabla queda, por tanto, tal como se observa a continuación:

**Tabla 8.15. Tabla B.1 de Excel con datos del ejemplo de la norma UNE 14825 (2).**

	Aire exterior °C	Coficiente de carga parcial %	Carga parcial kW	Potencia declarada (P <sub>dc</sub> ) kW	EER a la potencia declarada (EER <sub>d</sub> )	C <sub>d</sub>	C <sub>ru</sub>	EER a carga parcial (EER <sub>bin(Tj)</sub> )
<b>A</b>	35	100%	6.3	6.3	3.41	0.25	1	3.41
<b>B</b>	30	74%	4.64210526	4.64	5.2	0.25	1	5.20
<b>C</b>	25	47%	2.98421053	2.98	9.2	0.25	1.00	9.20
<b>D</b>	20	21%	1.32631579	1.5	17.4	0.25	0.88	16.90

Una vez obtenida la tabla B.1 se ha de generar la tabla B.2 de Cálculo del periodo para el SEERon. En esta tabla se cargan los valores de periodo, temperatura exterior y horas correspondientes al Anexo A de la norma UNE-EN 14825, concretamente de la tabla A.1, referida a los valores para el modo refrigeración.

A continuación se procede al cálculo para cada periodo de los valores de carga de calefacción, EERPL, demanda anual de refrigeración y aportación de energía anual, tal como se ha comentado en el apartado 7.2.1. La introducción de las fórmulas en el programa de Excel es directa, ya que para este caso, como los valores de periodo y las condiciones de carga parcial son las mismas para todos los casos, variando únicamente el valor de potencia de diseño, potencias declaradas y EER declarados, no es necesario hacer cálculos intermedios. Por tanto las fórmulas de cálculo e interpolaciones son introducidas directamente en el Excel, teniendo en cuenta que aunque varíen los datos mencionados, el procedimiento de cálculo siempre será el mismo.

Una vez hecho esto se calcula el valor del SEERon mediante la ecuación (Ec. 6).

Seguidamente se procede al cálculo del SEER de referencia. Para ello es necesario introducir en la hoja de Excel SEER las tablas E.1 (Tabla 8.16 de este proyecto) y E.3 de la norma UNE. Estas tablas presentan los valores de número de horas necesarios para el cálculo del SEER de referencia. Si el fabricante proporciona los datos de potencia de modo desactivado, en espera, termostato apagado y de dispositivo en modo de calentamiento de carácter, es posible calcular el SEER de referencia haciendo uso de la ya comentada ecuación (Ec. 7).

**Tabla 8.16. Número de horas utilizado para el cálculo del SEER de referencia. Fuente: UNE EN 14825 (2).**

		Sólo refrigeración	Reversible
A	Horas totales por año	8 760	8 760
B	Modo desactivado (H <sub>off</sub> )	5 088	0
C	Diferencia (A-B) = Horas para la estación de refrigeración de referencia, de la cual:	3 672	3 672
D	Termostato apagado (H <sub>TO</sub> )	221	221
E	En espera (H <sub>SB</sub> )	2 142	2 142
F	Diferencia (C-D-E) = Horas en modo activo sin corrección de retroceso	1 309	1 309
G	Corrección de retroceso	355	355
H	Diferencia (F-G) = (o F × 73%) = Horas en modo activo corregidas para el impacto de retroceso	954	954
I	Horas activas equivalentes (H <sub>CE</sub> )	350	350

Para este cálculo cabe destacar que, tal como se muestra en la Tabla 8.16, el valor de las horas utilizadas para el cálculo será diferente en función de si la bomba de calor trabaja sólo

en modo de refrigeración o presenta la posibilidad de trabajar de forma reversible. En el Excel se contemplan estas dos posibilidades introduciendo una celda con el nombre “Modo de funcionamiento”, la cual presenta una lista desplegable con las opciones “Sólo refrigeración” o “Reversible”. En función de la opción que seleccione el usuario, el Excel, haciendo uso de una simple condición SI, devolverá unos u otros valores de horas. De esta manera, el Excel permite realizar el cálculo de forma más automatizada, sin que sea necesario que el usuario introduzca los cambios de manera manual, tal como se observa en la Figura 8.8:

				Tabla E.1 Número de horas utilizado para el cálculo del SEER de referencia			
P <sub>designc</sub> [kW]	6.3					Sólo refrigeración	Reversible
P <sub>off</sub> [kW]	0.005			A	Horas totales por año	8760	8760
P <sub>sb</sub> [kW]	0.005			B	Modo desactivado (Hoff)	5088	0
P <sub>to</sub> [kW]	0.016			C	Diferencia (A-B)	3672	3672
P <sub>ck</sub> [kW]	0			D	Termostato apagado (H <sub>to</sub> )	221	221
				E	En espera (H <sub>se</sub> )	2142	2142
				F	Diferencia (C-D-E)	1309	1309
				G	Corrección de retroceso	355	355
				H	Diferencia (F-G)	954	954
H <sub>ce</sub> [h]	350			I	Horas activas equivalentes (H <sub>ce</sub> )	350	350
Q <sub>c</sub> [kWh]	2205						
				Tabla E.3 Número de horas del modo de dispositivo de calentamiento del cárter para			
Aportación (Termostato apagado) [kWh]	=SI((Modo_funcionamiento="Reversible";C94*M96;C94*L96)					Sólo refrigeración	Reversible
Aportación (En espera) [kWh]	10.71				Dispositivo de calentamiento del cárter (H <sub>ck</sub> )	7760	2672
Aportación (CK) [kWh]	0						
Aportación (desactivado) [kWh]	0						
SOLUCIÓN				SEER	7.6645		

Figura 8.8. Captura de pantalla del Excel, apartado cálculo del SEER de referencia.

### 8.2.1. Procedimiento según tipología de equipo

De forma análoga al proceso de creación del Excel para el caso del SCOP, el siguiente paso a seguir en el caso del SEER es la búsqueda de diversos ejemplos comerciales, observando las diferentes formas de presentación de los datos, para posteriormente adaptar el programa al tratamiento de los mismos, de tal manera que el usuario apenas haya de realizar cálculos.

No obstante, en este caso se dispone de menos documentación con los datos de cálculo para el SEER, de manera que tan solo se han encontrado ejemplos de presentación de los datos declarados de la máquina térmica de una forma directa, en la cual el fabricante proporciona una ficha técnica muy similar al modelo de ficha técnica que propone la UNE y que ya ha sido comentado a lo largo de este trabajo, presentando los datos declarados para cada condición de carga.

A continuación se detallan las diversas modificaciones realizadas sobre el Excel por medio del estudio de diversos ejemplos del mercado.

#### a) Caso bombas de calor de tecnología Inverter.

A continuación se muestra un caso muy similar al explicado en el apartado 8.1.2, pero para

el cálculo del SEER. En este caso se presenta la información técnica de las bombas de calor de forma muy similar al modelo de ficha técnica que presenta la norma UNE-EN 14825.

Los datos se presentan tanto para el funcionamiento en modo calefacción (cálculo del SCOP), como para modo refrigeración (cálculo del SEER). Así, tal como se puede observar en la Tabla 8.17, se muestran los valores de carga de diseño tanto en modo calefacción (para los climas “A”, “W” o “C” según corresponda), como para modo de refrigeración.

Figuran también los valores de potencia declarada y ratio de eficiencia energético declarado para las distintas condiciones de carga parcial, siempre referenciados a una temperatura interior de bulbo seco de 27°C, que es la que se señala en la norma UNE. De esta manera, en el Excel creado es posible introducir directamente estos valores en la tabla B.1 de la hoja SEER y el programa calculará automáticamente el resultado del valor de SEERon, que en este caso será de 7.99. Se observa por tanto que para obtener este valor, para este caso concreto de bomba de calor, el programa ya está acondicionado para realizar el cálculo de manera automática.

**Tabla 8.17. Extracto de ficha técnica de bomba de calor Mitsubishi. Fuente: Mitsubishi (15).**

Information to identify the model(s) to which the information relates to:				If function includes heating: Indicate the heating season the information relates to. Indicated values should relate to one heating season at a time. Include at least the heating season 'Average'					
Indoor unit model name		SRK63ZR-S		Average (mandatory)		Yes			
Outdoor unit model name		SRC63ZR-S		Warmer (if designated)		Yes			
Function (indicate if present)				Colder (if designated)		No			
cooling		Yes							
heating		Yes							
Item				Item					
		symbol	value	unit			symbol	value	class
Design load				Seasonal efficiency and energy efficiency class					
cooling		Pdesignc	6.30	kW	cooling		SEER	7.60	A++
heating / Average		Pdesignh	5.40	kW	heating / Average		SCOP/A	4.70	A++
heating / Warmer		Pdesignh	6.50	kW	heating / Warmer		SCOP/W	6.00	A+++
heating / Colder		Pdesignh	-	kW	heating / Colder		SCOP/C	-	-
				unit					
Declared capacity at outdoor temperature Tdesignh				Back up heating capacity at outdoor temperature Tdesignh					
heating / Average (-10°C)		Pdh	5.40	kW	heating / Average (-10°C)		elbu	0	kW
heating / Warmer (2°C)		Pdh	6.50	kW	heating / Warmer (2°C)		elbu	0	kW
heating / Colder (-22°C)		Pdh	-	kW	heating / Colder (-22°C)		elbu	-	kW
Declared capacity for cooling, at indoor temperature 27(19)°C and outdoor temperature Tj				Declared energy efficiency ratio, at indoor temperature 27(19)°C and outdoor temperature Tj					
Tj=35°C		Pdc	6.30	kW	Tj=35°C		EERd	3.41	-
Tj=30°C		Pdc	4.64	kW	Tj=30°C		EERd	5.20	-
Tj=25°C		Pdc	2.98	kW	Tj=25°C		EERd	9.20	-
Tj=20°C		Pdc	1.50	kW	Tj=20°C		EERd	17.40	-

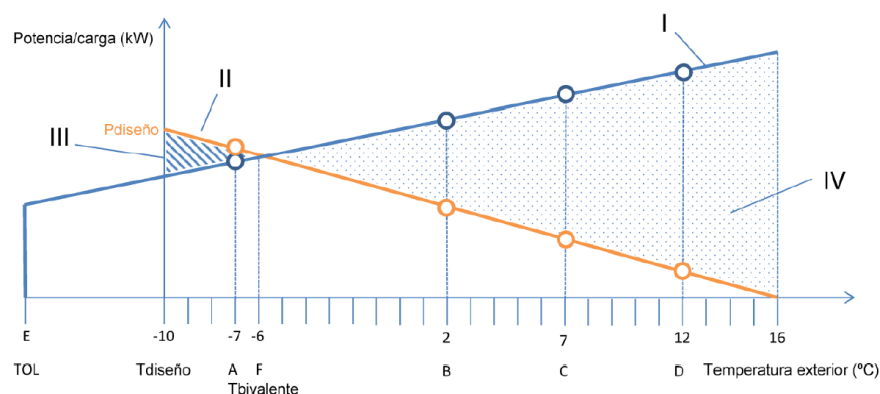
Adicionalmente, tal como se muestra en la Tabla 8.18, se presentan los valores de potencia para modo desactivado, en espera, termostato apagado y de dispositivo en modo de calentamiento de carácter. Estos valores son los necesarios para el cálculo del SEER, de acuerdo a la (Ec. 7). En este caso concreto, se habrá de seleccionar la opción de modo de funcionamiento reversible, ya que la máquina térmica puede funcionar en modo calefacción o refrigeración, e introducir dichos valores de potencia en las casillas correspondientes, y el programa calculará el valor de SEER de referencia, que resulta en este caso de un valor de 7.66. Se puede comprobar dicho valor en la Tabla 8.17, con un SEER de 7.6.

Electric power input in power modes other than 'active mode'				Annual electricity consumption			
off mode	Poff	5	W	cooling	Qce	291	kWh/a
standby mode	Psb	5	W	heating / Average	Qhe	1610	kWh/a
thermostat-off mode	Pto	16	W	heating / Warmer	Qhe	1517	kWh/a
crankcase heater mode	Pck	0	W	heating / colder	Qhe	-	kWh/a

La temperatura bivalente es definida en la norma UNE-EN 14825 como:

Esta temperatura resulta de gran relevancia en el cálculo del SCOPnet, SCOPon y SCOP de referencia, ya que a partir de ella la bomba de calor será capaz de aportar la totalidad de la potencia requerida. Normalmente es un dato que proporciona el fabricante en su ficha técnica, pero en el caso de que no sea así es posible calcularla por medio de la comparación entre la carga parcial y la potencia declarada de la máquina. No obstante, este cálculo, que a priori parece sencillo, se complica para el caso de las bombas de calor de potencia variable con una o varias etapas.

Comenzando por el caso más sencillo, para una bomba de calor de potencia fija, tal y como se muestra en la norma UNE, la temperatura bivalente puede obtenerse como la intersección entre los valores de carga parcial y potencia declarada, tal y como se observa en la Gráfica 8.6:



**Gráfica 8.6. Representación gráfica de la recta de carga parcial frente a la potencia declarada para el ejemplo de cálculo del Anexo C de la norma UNE (2).**

Los datos utilizados para la obtención de esta gráfica son los presentes en el Anexo C de la norma UNE-EN 14825. La recta de color naranja, con el número 11, representa la recta de

carga parcial, mientras que la recta azul (I) se refiere a la potencia declarada. La temperatura bivalente es el punto de intersección entre ambas, con un valor de  $-6^{\circ}\text{C}$ . Por debajo de ella, la máquina térmica no es capaz de cubrir el 100% de la demanda y por tanto se hace necesario el uso de un calefactor eléctrico de reserva, que ha de cubrir una potencia de la diferencia entre la carga parcial y la potencia declarada, representada en la gráfica como el área sombreada III, entre la temperatura de diseño y la temperatura bivalente.

En cuanto al área sombreada IV, representa el ciclo de encendido/apagado de la bomba de calor. Hay que tener en cuenta el método de funcionamiento de las bombas de calor de capacidad fija, que hacen frente a las cargas variables mediante la variación del tiempo de funcionamiento, efectuando dicho ciclo de encendido/apagado para adaptarse a la demanda.

Por tanto, para este caso, resulta sencillo calcular la temperatura bivalente, ya que tan solo es necesario obtener las dos rectas y luego calcular la intersección de las mismas. Esto se resuelve de forma sencilla en el Excel. Sabiendo que la ecuación de la recta es de la forma " $y = a + bx$ ", se puede realizar el cálculo obteniendo los valores " $a$ " y " $b$ " para el conjunto de valores de carga parcial o potencia declarada. Así, se calcula la pendiente " $b$ " mediante la fórmula ESTIMACION.LINEAL, empleando como valores " $y$ " los de potencia y " $x$ " los de temperaturas de carga parcial. Para obtener la constante " $a$ " se hace uso de la expresión INTERSECCION.EJE, con los mismos parámetros de " $y$ " y " $x$ ". Una vez hecho esto para ambos casos de carga parcial y potencia declarada, se obtiene la intersección de ambas rectas mediante un Solver, igualando ambas ecuaciones, escritas en función de la temperatura bivalente objetivo de cálculo.

Adicionalmente, se considera la posibilidad de que el comportamiento de la potencia declarada no sea asimilable a una recta, sino a otra función, tal como una polinómica. Puede suceder que los valores de potencia declarada no presenten un comportamiento lineal, por lo que se decide realizar el cálculo con una aproximación polinómica y comparar ambas aproximaciones para decidir cuál es el mejor ajuste. En este caso se opta por una función polinómica de grado tres, de la forma:

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad (\text{Ec. 16})$$

Para realizar la función polinómica es posible utilizar la misma fórmula ESTIMACION.LINEAL que para el caso anterior, pero señalando en la ecuación, entre corchetes, qué aproximación se desea obtener. Como deseamos realizar una ecuación de la forma de la (Ec. 16), se deberán introducir los números 1, 2 y 3 (véase Figura 8.9). Adicionalmente, como el objetivo es encontrar los parámetros " $a$ ", " $b$ ", " $c$ " y " $d$ ", esta función de Excel ha de ser en formato de matriz, seleccionando las 4 casillas de cálculo.



$$=ESTIMACION.LINEAL(Potencia\_declarada;Temperatura^{\{1;2;3\}};1;1)$$

**Figura 8.9. Fórmula de cálculo de la aproximación polinómica.**

No obstante, si se aplica este procedimiento para el caso de una bomba de calor de capacidad variable, los resultados obtenidos no son correctos. Esto se debe a que en este caso el comportamiento de la potencia declarada no se puede suponer como el de una recta, ya que, si bien podría suponerse correcto este comportamiento por debajo de la temperatura bivalente, una vez se alcanza dicha temperatura la potencia se adapta a la demanda, tal como se observa en la Gráfica 8.2 explicada anteriormente. De esta manera, si se asimila el comportamiento de la potencia declarada a una recta, el error en el cálculo de la  $T_{bivalente}$  sería considerable. Por tanto se ha de pensar en un nuevo método de cálculo de la misma.

Se considera que, para realizar el cálculo correctamente, se han de tener en cuenta tan solo los valores de potencia declarada por debajo de la temperatura bivalente, y a partir de ellos obtener la regresión lineal para poder obtener el punto de intersección con la recta de carga parcial. Así se obtiene un valor más exacto de la temperatura bivalente, ya que el proceso no considera los valores de potencia por encima de la misma, que para el caso de las máquinas térmicas de capacidad variable se adapta a la carga parcial y por tanto distorsiona el cálculo.

Para realizar este nuevo procedimiento en el Excel, se añade una columna a la tabla de datos declarados, que representará la diferencia entre la carga parcial y la potencia declarada. En caso de que esta diferencia sea mayor a cero, esos datos serán utilizados en los cálculos, mientras que en caso contrario serán desechados. Una vez obtenidos estos valores, se ha de proceder al cálculo de la regresión lineal, con el mismo procedimiento explicado anteriormente pero solo con estos valores.

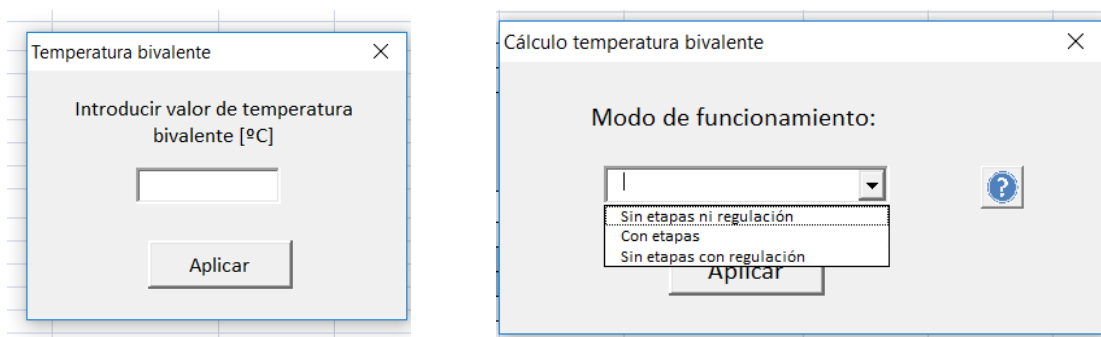
Una vez analizada toda esta casuística se ha de implantar en el programa de Excel de tal manera que el propio sistema resuelva de una forma u otra el problema según la tipología de máquina objeto de estudio. De forma general, pueden darse tres casos que se han de resolver tal como se ha comentado en el texto:

- Bomba de calor sin etapas ni regulación: se ha de realizar una regresión mediante una aproximación polinómica de grado 3 de todos los valores de la potencia declarada.
- Bomba de calor con varias etapas: se ha de seguir el mismo procedimiento que en el caso anterior pero utilizando los datos declarados de la etapa de máxima capacidad.
- Bomba de calor sin etapas pero con regulación: se ha de realizar el cálculo teniendo



en cuenta tan solo los datos de potencia por debajo de la temperatura bivalente.

Tal como se ha comentado, existe la posibilidad de que el fabricante facilite el dato de temperatura bivalente o por el contrario sea necesario calcularlo. Para implantar esto en el programa se decide añadir dos botones de opción para la  $T_{biv}$ , uno con la oración “Dato proporcionado por el fabricante”, y otro con “Se ha de calcular”. Si se selecciona el primer caso se desplegará una UserForm que permitirá la introducción directa del valor de temperatura, tal como se muestra en la Figura 8.10 en la primera pestaña. Por el contrario en caso de que se seleccione la otra opción se genera una lista desplegable de Excel que presenta las tres opciones de modos de funcionamiento citadas, de manera que el usuario ha de seleccionar el modo de funcionamiento de la máquina térmica y a partir de ello el programa realizará los cálculos pertinentes.



**Figura 8.10. UserForm para la introducción o el cálculo de la temperatura bivalente.**

En caso de que el usuario seleccione la opción “Sin etapas ni regulación”, el procedimiento seguido será tal como se ha explicado en el ejemplo de la norma UNE, aproximando los valores de carga parcial a una recta y los de potencia declarada a un polinomio de grado tres e igualando ambas ecuaciones.

En el caso de que la opción elegida sea “Con varias etapas”, el proceso será análogo al anterior, pero teniendo en cuenta que los datos de potencia declarada para las distintas condiciones de carga han de ser tomados para la etapa de máxima potencia.

El modo “Sin etapas pero con regulación” es el que presenta una mayor complicación a la hora de resolver, ya que en este caso no es posible tomar todos los datos de potencia declarada, pues inducirán a error, y el cálculo se ha de realizar considerando tan solo los valores por debajo de la temperatura bivalente. Para ello, se añade una nueva columna que representará la diferencia entre la carga parcial y la potencia declarada. A continuación, se hace servir la función CONTAR.SI de Excel, que contará el número de valores de la tabla que son mayores que cero (y que, por tanto, se encuentran por debajo de la temperatura bivalente).

Una vez conocidos el número de valores por debajo de la temperatura bivalente, la regresión de puntos para obtener el comportamiento de la potencia declarada será de la forma:

- Si se tienen 2 valores por debajo de la temperatura bivalente: la potencia declarada se comportará como una recta, y se halla, tal como se ha explicado en este apartado, con las expresiones ESTIMACION.LINEAL y INTERSECCION.EJE.
- Si se tienen 3 valores por debajo de la temperatura bivalente: se realizará una aproximación polinómica de grado 2, mediante la fórmula matricial ESTIMACION.LINEAL y señalando en el rango x la fórmula de la expresión {1;2;3}.
- Si se tienen 4 o 5 valores por debajo de la temperatura bivalente: la aproximación polinómica será de grado 3.

Según la opción que seleccione el usuario en la lista desplegable los cálculos se realizarán en una u otra tabla de datos de potencia declarada de Excel. Este hecho implica la posibilidad de confusión del usuario, al visualizar tres tablas distintas que calculan el mismo parámetro. Para evitar esto se añade en el código introducido en la UserForm una serie de instrucciones que, dependiendo de la opción seleccionada, oculten las tablas restantes. Por ejemplo, si se ha seleccionado la opción “Con etapas”, el usuario solo podrá visualizar la tabla de datos para dicho caso, mientras que las tablas correspondientes a una etapa sin y con regulación permanecerán ocultas. En los anexos E y F de este proyecto se presenta de forma más detallada el código empleado para la programación de las macros para el cálculo de la temperatura bivalente.

## 9. Presupuesto del proyecto

La presentación de un capítulo de análisis de presupuesto en un Trabajo Final de Máster supone un apartado básico e indispensable. Para el caso de estudio, el desarrollo de una herramienta de Excel, los costes asociados al mismo se relacionan principalmente con la mano de obra encargada de realizar la tarea.

Para este trabajo concreto, se contempla la participación de un ingeniero Junior (encargado del desarrollo del programa), bajo la supervisión de un ingeniero Senior. La labor de confección y diseño de la herramienta de Excel se comienza en el mes de julio de 2016 y finaliza en enero de 2017, durante un periodo de 6 meses, con un total de 450 horas de trabajo (el ingeniero Junior trabaja a media jornada). En la siguiente Tabla 9.1 se muestran los costes asociados al concepto de desarrollo de la ingeniería (costes personales):

**Tabla 9.1. Tabla de partida de costes de personal.**

<b>Costes asociados al personal</b>			
CONCEPTO	CANTIDAD	COSTE UNITARIO	COSTE TOTAL
Coste ingeniero Junior	450	30 €/hora	13500 €
Coste ingeniero Senior	24	60 €/hora	1440 €
<b>Coste total del personal</b>			<b>14940 €</b>

Adicionalmente al coste debido al trabajo de los ingenieros, se ha de considerar la partida de costes debidos al equipo informático utilizado:

**Tabla 9.2. Tabla de costes asociados al equipo informático utilizado.**

<b>Costes asociados al equipo informático</b>		
CONCEPTO	CANTIDAD	COSTE TOTAL
Ordenador Sony Vaio	1 unidad	850 €
Coste total		850 €
Amortización equipo (4 años)		212,5 €
Amortización 6 meses		106,25 €

Este equipo utilizado presenta un cierto consumo, el cual conlleva también un coste un coste asociado:

**Tabla 9.3. Costes asociados al consumo eléctrico.**

<b>Costes asociados al consumo eléctrico</b>				
CONCEPTO	Potencia	Uso	Coste energía eléctrica	Coste total
Ordenador	45 W	450 horas	0,141033 €/kWh <sup>3</sup>	2,856 €

Finalmente se han de considerar los costes relativos a la utilización o compra de programas informáticos, así como de la norma de referencia seguida:

**Tabla 9.4. Costes asociados a recursos de ingeniería.**

<b>Costes asociados a recursos de ingeniería</b>				
CONCEPTO	Valor licencia	Vida útil	Uso	Valor
Paquete Microsoft Office	90 €	1 año	450 h	47 €
UNE-EN 14825:2014	91 €	Hasta anulación	450 h	91 €
<b>Coste total</b>				<b>138 €</b>

Una vez obtenidos estos valores de coste, se puede obtener el coste total del proyecto, teniendo en cuenta el IVA del 21%:

**Tabla 9.5. Coste total del proyecto.**

Costes asociados al personal	8190 €
Costes asociados al equipo informático	106,25 €
Costes asociados al consumo eléctrico	2,856 €
Costes asociados a recursos de ingeniería	138 €
Costes totales sin IVA	15187,11 €
IVA (21%)	3189,29 €
<b>COSTE TOTAL</b>	<b>18376,4 €</b>

Se ha de señalar que para el cálculo del presupuesto llevado a cabo en este proyecto se ha considerado que los costes estructurales, esto es, los costes relacionados con la disponibilidad de un espacio físico en el cual realizar los trabajos, son cero.

<sup>3</sup> Precio fijo energía vigente desde el 1 de enero de 2016.

Adicionalmente se ha de mencionar que, tal como se ha comentado a lo largo de este proyecto, el hecho de desarrollar una herramienta de Excel de cálculo del rendimiento estacional, implica una reducción notable en la carga de trabajo del ingeniero encargado de realizar estos cálculos, de forma que este reduzca de manera significativa el tiempo empleado en dicho cálculo, comparativamente con la situación en la cual ha de obtener los valores de una forma más manual. Las horas de trabajo presentan un valor monetario, por consiguiente, se considera necesario destacar que, aunque en el cálculo del presupuesto no se ha considerado, el desarrollo de este programa implica un cierto ahorro.

## 10. Impacto medioambiental

El estudio de impacto ambiental de un proyecto de ingeniería representa un apartado de vital importancia e indispensable en cualquier documento técnico tal como es el caso de un Trabajo Fin de Máster.

En la temática de estudio de este proyecto, a priori puede afirmarse que no se trabaja con ningún elemento considerado como peligroso en la normativa vigente, puesto que se trata de una herramienta informática de cálculo de rendimientos. Por tanto, en el desarrollo del trabajo no se ha hecho uso de materiales o procesos que comporten un riesgo para el medioambiente.

No obstante, puede aplicarse un enfoque distinto a este trabajo, el cual sí representa un hecho relevante en cuanto a normativa ambiental. Aunque el objetivo del trabajo es el desarrollo de una herramienta de Excel, no se ha de olvidar el hecho de que este programa de cálculo obtendrá los valores de rendimiento estacional de bombas de calor, las cuales a partir de un cierto valor de rendimiento podrán considerarse como fuentes renovables. Por consiguiente, el desarrollo de una herramienta sencilla de cálculo de rendimientos puede presentar como consecuencia una cierta promoción e impulso hacia la instalación de este tipo de maquinaria, con su consiguiente impacto positivo en el medioambiente debido a la no utilización de recursos fósiles.

Adicionalmente, los datos utilizados en este trabajo sobre potencias declaradas, SCOP y SEER, correspondientes a distintos fabricantes, han sido obtenidos de las distintas fichas técnicas de los mismos, pero no hay que olvidar que dichos datos son obtenidos mediante ensayos. En dichos procesos se ponen en funcionamiento las bombas de calor a las distintas condiciones especificadas, lo cual implica un gasto de energía y un cierto impacto.



## Conclusiones

El rendimiento estacional, SCOP en el caso de calefacción y SEER para refrigeración, es un parámetro de gran importancia en las bombas de calor, representando un indicativo de la calidad de la máquina térmica. Adicionalmente este valor resulta de utilidad en la clasificación de las mismas como energías procedentes de fuentes renovables o no. Es por ello que el cálculo del rendimiento estacional resulta de gran interés para cualquier instalación de bomba de calor, de manera que el desarrollo de un proceso automático de cálculo del mismo satisface una necesidad del mercado no cubierta.

La programación de una herramienta de Excel capaz de calcular el rendimiento estacional para distintos equipos y fabricantes del sector, siguiendo la metodología descrita en la norma UNE-EN 14825, ha permitido crear una utilidad que ha de facilitar al usuario el trabajo de cálculo manual, de manera que se busca la máxima sencillez posible a la hora de introducir la metodología de cálculo seguida en el programa, con el propósito de que resulte de fácil comprensión y utilización.

Pareja a la sencillez de uso se encuentra la dificultad que implica el hecho de que la herramienta debe de realizar el cálculo, teniendo en cuenta la amplitud de situaciones y tipologías concretas que presentan los equipos comercializados. Es por esta razón que se decide, de cara a la automatización del cálculo, trabajar con macros de Excel de tal manera que en función de las opciones de tipología de máquina y condiciones climáticas que el usuario seleccione, el programa procederá de uno u otro modo de cálculo, y tomando los datos presentes en la normativa correspondientes a cada situación.

Para el caso del SCOP, se concluye que el cálculo es dependiente de tres parámetros principales: el tipo de bomba de calor, la temperatura y la zona climática. Una vez seleccionados dichos factores clave en el cálculo el proceso es automatizado. En lo que respecta al SEER, la situación se simplifica, ya que no se han de tener en cuenta las zonas climáticas en el cálculo.

El parámetro de temperatura bivalente, para el caso de trabajo en modo calefacción, resulta de gran importancia a la hora de calcular el rendimiento estacional. En el caso de que el fabricante no lo proporcione se ha de calcular y para ello se ha de considerar la tipología de bomba de calor objeto de estudio. La clasificación básica empleada en este trabajo para el cálculo de la temperatura bivalente, de manera que cada tipología presenta un procedimiento u otro es diferenciando entre si la bomba de calor presenta regulación de potencia o no, y en el primer caso si se realiza mediante una o varias etapas.

El programa de Excel elaborado teniendo en cuenta las diversas consideraciones en cuanto



a metodologías y tipologías de bombas de calor comercializadas se ha testado con amplitud de fichas técnicas disponibles por distintos fabricantes, comprobando así su funcionamiento correcto. No obstante, se deja abierta la posibilidad de posibles modificaciones posteriores en la situación de que se hallen casos no contemplados, o cambios y mejoras en los procesos de cálculo.

## Bibliografía

### Referencias bibliográficas

1. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. IDAE. Síntesis del Estudio Parque de Bombas de Calor en España. En: . 2016, p. 42.
2. Asociación Española de Normalización y Certificación. UNE-EN 14825:2014. En: *Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y la refrigeración de locales. Ensayos y clasificación en condiciones de carga parcial y cálculo del rendimiento estacional*. 2016, p. 88.
3. Europeo, P. Directiva 2009/28/Ce Del Parlamento Europeo Y Del Consejo de 23 de abril de 2009. En: *Diario Oficial de la Unión Europea* [en línea]. 2009, vol. 140, no. 2, p. 16-62. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2009/140/L00016-00062.pdf>.
4. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Prestaciones Medias Estacionales De Las Bombas De Calor Para Producción De Calor En Edificios. En: . 2014, p. 20.
5. Europeo, P. Directiva 2010/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo. En: *Diario Oficial de la Unión Europea*. 2010, p. 1-12.
6. Diario Oficial de la Unión Europea. REGLAMENTO DELEGADO (UE) No 626/2011 DE LA COMISIÓN. En: . 2011, no. 6, p. 1-72.
7. Asociación Española de Normalización y Certificación. UNE-EN 14511:2014. En: *Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y refrigeración de locales*. 2014, p. 116.
8. Asociación Española de Normalización y Certificación. UNE-EN 15316-4-2. En: *Sistemas de calefacción en los edificios. Método para el cálculo de los requisitos de energía y de la eficiencia del sistema*. 2009, p. 138.
9. Asociación Española de Normalización y Certificación. Bombas de calor con compresor accionado eléctricamente. Ensayos y requisitos para el marcado de equipos para agua caliente sanitaria. UNE-EN 16147. En: . 2011, p. 36.
10. Fomento, M. de. Orden FOM/1635/2013. En: *Real Decreto*. 2013, p. 67137-67209. DOI CTE-DB-SE.
11. Industria, D.E. Reglamento De Instalaciones Termicas En Los Edificios. En: *Boletín Oficial de Estado*. 2013, p. 137.
12. Diario Oficial de la Unión Europea. DECISIÓN DE LA COMISIÓN de 1 de marzo de 2013. En: . 2016, no. 5, p. 27-35.
13. Yutaki, S. Catálogo Técnico. En: . no. V, p. 13.

14. Mitsubishi. Data Book Ecodan. En: . 2010, no. January.
15. Mitsubishi Heavy Industries, L. Data Book. En: . 2010, no. January, p. 13.

## Bibliografía complementaria

16. AFEC - Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización. En: [en línea]. [consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <http://www.afec.es/es/index.asp>.
17. Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización. Bomba de Calor, energía natural para climatizar tu hogar · AFEC. En: [en línea]. [consulta: 12 enero 2017]. Disponible en: <http://www.bombadecolor.org/>.
18. ASHRAE, ASHRAE Handbook—HVAC System and Equipment (SI), ASHRAE, 1791 Tullie Circle, Atlanta, GA 30329, (2016), *chapter 26, Air to air energy recovery*
19. ASHRAE, ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI), ASHRAE, 1791 Tullie Circle, Atlanta, GA 30329, (2013), *chapter 16, ventilation and infiltration*
20. IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, *Guía técnica de ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización*. Madrid, 2010